



HAL
open science

Analyse de l'entraînement et des conséquences fonctionnelles du remodelage cardio-vasculaire étudié en IRM chez le triathlète amateur longue distance

Anne-Charlotte Dupont

► To cite this version:

Anne-Charlotte Dupont. Analyse de l'entraînement et des conséquences fonctionnelles du remodelage cardio-vasculaire étudié en IRM chez le triathlète amateur longue distance. Cardiologie et système cardiovasculaire. Université de Lorraine, 2021. Français. NNT : 2021LORR0263 . tel-03669541

HAL Id: tel-03669541

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-03669541>

Submitted on 16 May 2022

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.



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

Thèse

Présentée et soutenue publiquement pour l'obtention du titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE LORRAINE

Mention : « Sciences de la Vie et de la Santé »

par **Madame Anne-Charlotte DUPONT**

Analyse de l'entraînement et des conséquences fonctionnelles du remodelage cardio-vasculaire étudié en IRM chez le triathlète amateur longue distance

Le lundi 29 novembre 2021

Membres du jury

Directeurs de thèse	Mr Damien MANDRY	PU-PH, Université de Lorraine, Nancy, France
	Mr Mathias POUSSEL	PU-PH, Université de Lorraine, Nancy, France
Rapporteurs	Mr Xavier BIGARD	MD, PhD, HDR
	Mme Lucie CASSAGNES	PU-PH, Université Clermont Auvergne, France
Présidente	Mme Laure JOLY	PU-PH, Université de Lorraine, Nancy, France
Examineurs	Mr François CARRE	PU-PH, Université de Rennes 1, France
	Mme Corinne GUINGAMP	MCU, Université de Lorraine, Nancy, France
	Mme Solène LE DOUAIRON LAHAYE	MCU, Université de Rennes 2, France

Thèse

Présentée et soutenue publiquement pour l'obtention du titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE LORRAINE

Mention : « Sciences de la Vie et de la Santé »

par **Madame Anne-Charlotte DUPONT**

**Analyse de l'entraînement et des conséquences fonctionnelles
du remodelage cardio-vasculaire étudié en IRM
chez le triathlète amateur longue distance**

Le lundi 29 novembre 2021

Membres du jury

Directeurs de thèse	Mr Damien MANDRY	PU-PH, Université de Lorraine, Nancy, France
	Mr Mathias POUSSEL	PU-PH, Université de Lorraine, Nancy, France
Rapporteurs	Mr Xavier BIGARD	MD, PhD, HDR
	Mme Lucie CASSAGNES	PU-PH, Université Clermont Auvergne, France
Présidente	Mme Laure JOLY	PU-PH, Université de Lorraine, Nancy, France
Examineurs	Mr François CARRE	PU-PH, Université de Rennes 1, France
	Mme Corinne GUINGAMP	MCU, Université de Lorraine, Nancy, France
	Mme Solène LE DOUAIRON LAHAYE	MCU, Université de Rennes 2, France

**Laboratoire IADI INSERM U1254 – Imagerie Adaptative Diagnostique et Interventionnelle
CHRU de Nancy site Brabois – Bâtiment Recherche – Rue du Morvan – 54511 Vandoeuvre-lès-Nancy**

*A mon Papa,
parti bien trop tôt*

*« Le courage est très important.
Comme le muscle, il prend de la force à l'usage. »*

Ruth Gordon

Remerciements

Je souhaite tout d'abord remercier le Professeur Jacques FELBLINGER qui m'a accueillie à bras ouverts dès mes débuts dans la recherche, au sein de son unité INSERM le laboratoire IADI. C'est grâce à vous que j'ai pu transformer mon Stage d'Initiation à la Recherche (SIR) – dit l'essai – réalisé au cours de l'année universitaire 2008-2009, en Master 2 puis en Thèse de Sciences. C'est grâce à vous que j'ai eu l'envie de développer mon parcours professionnel dans la recherche. Je n'oublierai pas non plus le soutien que vous m'avez apporté avec votre collaboratrice du CIC-IT Marine BEAUMONT, pour mener à terme ce protocole de recherche clinique COATRI.

Je souhaite également remercier le Professeur Laure JOLY qui a accepté de s'investir dans ce vaste projet avec son équipe. Ses travaux et ses connaissances en matière de vieillissement artériel et de remodelage vasculaire vont nous permettre de mieux comprendre l'impact que peut avoir un sport comme le triathlon longue distance sur ces phénomènes.

Je souhaite ensuite remercier mes deux directeurs de thèse, les Professeurs Damien MANDRY et Mathias POUSSEL, qui m'auront accompagnée toutes ces années et surtout soutenue les deux dernières, tant la route aura été longue et parsemée d'embûches jusqu'à la soutenance. J'aurai d'ailleurs une pensée émue envers le Professeur MANDRY, qui aura été mon Directeur « de rédaction » pour toutes les grandes étapes de mon parcours Recherche, en étant successivement mon directeur de mémoire de SIR en 2009, puis de Master 2 en 2014 et enfin de Thèse de Sciences en 2021. J'estime avoir « grandi » à tes côtés dans ce monde particulier. Aujourd'hui, une page va se tourner mais je te serai toujours reconnaissante pour tout ce que tu m'as apporté durant toutes ces années. Encore une fois, merci.

Je souhaite également remercier les Professeurs François CARRE et Pierre-Yves MARIE pour leur suivi et leur accompagnement au cours de ces années de thèse. Leur savoir et leurs conseils nous auront permis d'orienter au mieux chaque avancée jusqu'au but final de ce projet de recherche.

J'ai bien entendu une pensée chaleureuse pour toutes les personnes qui auront contribué à la réussite de ce projet, à commencer par Aboubaker CHERIFI, mon chef de projet, qui m'aura épaulée et nettement facilité la tâche pour tous les aspects administratifs qu'exigent la genèse et la mise en place d'un projet de recherche clinique comme COATRI. Je remercie également ma « statisticienne préférée » Gabriela HOSSU, pour sa patience et nos *brainstormings*, qui vont se poursuivre dans les semaines à venir. Tu m'as rendue la statistique plus abordable, ce qui aura probablement contribué à tirer le meilleur – je l'espère – des résultats de cette vaste étude.

Je souhaite également remercier Fabienne ANTOINE pour tout son travail de vérification et de bonne tenue des dossiers de nos volontaires. Grâce à toi, le déroulement de nos vacances et la saisie de nos données brutes auront été nettement facilités par ta gestion rigoureuse, un gain de temps et un confort plus qu'appréciables dans ce si large travail. A cette occasion, je remercie Camille HUYNH et Emeline LUC, dans le cadre de leur SIR, qui nous auront aidés à traiter nos données en vue de nos résultats.

Bien entendu, je n'oublie pas les manipulateurs à l'IRM, que je remercie pour leur adaptabilité et leur sympathie à toute épreuve et ce, malgré les différents contretemps que nous avons pu rencontrer à l'occasion des 185 visites environ organisées dans le cadre de COATRI ; ainsi que tous les collègues du IADI et du CIC-IT qui auront contribué de près ou de loin dans ce projet.

Enfin, je souhaite remercier plus que chaleureusement les 63 volontaires – 34 triathlètes et 29 contrôles – qui auront accepté de participer à l'étude COATRI. Je ne peux malheureusement pas tous vous citer mais sans vous, sans votre précieux engagement, nous n'aurons pas pu aller au bout de ce projet comme nous avons pu le faire. Encore une fois, merci !

Pour finir, je souhaite remercier tous mes amis pour leurs encouragements et leur soutien durant toutes ces années, même s'ils ne comprenaient pas toujours ce que je leur racontais. J'ai une pensée toute particulière pour Jenny, Christelle et Cristina, mais aussi pour Pierre, Jérémy, Julien et François. Je remercie également toutes celles et ceux qui se sont libérés pour assister à la soutenance, que ce soit en présentiel ou en visioconférence : votre présence et donc votre soutien m'auront beaucoup touchée et émue. Mille mercis. Sans oublier Djésia, mon double de PhD et d'ailleurs, tant nos parcours auront été proches dans différents aspects, pour sa bonne humeur et son écoute depuis tant d'années, mais aussi pour son aide jusqu'aux dernières minutes qui auront précédé la soutenance.

Enfin, je remercie tous les membres de ma famille qui m'ont toujours soutenue depuis toutes ces années et accompagnée dans ce projet. Il aura été difficile pour eux, parfois, de me suivre tant mon parcours aura été riche, mais ils l'auront fait de la meilleure manière qu'il soit. Mais pas autant que celui qui partage ma vie depuis plusieurs années, devenu mon mari en cours de thèse, Sébastien. Sans toi, la route aura été beaucoup plus longue et difficile à arpenter. Mille mercis ne sont pas suffisants pour tout ce que tu as fait, fait et fera encore pour moi. Je me sais extrêmement chanceuse et reconnaissante envers le destin, qui m'aura mise sur ton chemin ce jour-là. Ou plutôt, devrais-je dire « [...] qui t'aura mis sur cette portion de course à pied ce jour-là ».

Résumé

Analyse de l'entraînement et des conséquences fonctionnelles du remodelage cardio-vasculaire étudié en IRM chez le triathlète amateur longue distance

Le triathlon est un sport d'endurance en pleine expansion, connu pour son importante sollicitation cardio-vasculaire. Ce travail porte sur l'impact que peut avoir la pratique du triathlon longue distance (half-ironman et plus) sur le système cardio-vasculaire. Cette rédaction propose une étude descriptive de l'entraînement des triathlètes puis une analyse des variations de la compliance aortique et du remodelage cardiaque mesurés grâce à l'IRM cardio-vasculaire au cours de la saison sportive.

34 triathlètes (Tri) de sexe masculin pratiquant le triathlon longue distance et âgés de 19 à 39 ans ont été inclus, ainsi que 29 volontaires sains appariés sur le sexe et l'âge, et insuffisamment actifs (Ctrl) selon les recommandations de l'Organisation Mondiale de la Santé. Les triathlètes ont fourni leurs données d'entraînement via un agenda dédié. Tous les volontaires ont réalisé trois visites (V1, V2, V3) réparties au cours de la saison sportive. Chaque visite comprenait une tonométrie d'aplanation ainsi qu'une IRM cardio-vasculaire. Cet examen d'imagerie a permis entre autres de mesurer les sections aortiques et les volumes ventriculaires droits et gauches.

Pour l'année 2018, les triathlètes ont déclaré s'entraîner en moyenne $10,5 \pm 2,4$ heures par semaine. Au cours des six mois d'entraînement qui ont précédé la course de référence, les paramètres hebdomadaires moyens d'entraînement sont les suivants : *training load* = 3244 ± 2225 ; *monotony* = $1,14 \pm 0,44$; *strain* = 4070 ± 4252 ; *fitness* = -3610 ± 3967 . La compliance de l'aorte ascendante calculée avec la pression pulsée périphérique était significativement plus élevée dans le groupe Tri à V2 ($3,85 \pm 1,19 \cdot 10^{-2}$ vs $3,25 \pm 0,88 \cdot 10^{-2}$ cm²/mmHg ; $p = 0,032$) et à V3 ($3,85 \pm 1,09 \cdot 10^{-2}$ vs $3,25 \pm 0,92 \cdot 10^{-2}$ cm²/mmHg ; $p = 0,027$), sans variation longitudinale au cours de la saison sportive ($p = 0,465$). La majorité des volumes ventriculaires gauches et droits étaient significativement plus élevés dans le groupe Tri et pour les trois visites, mais sans variation longitudinale significative.

Ces résultats sont en faveur de l'existence d'adaptations cardiaques stables dans le temps mais d'apparition ancienne. Elles sont liées à la pratique régulière et suffisamment soutenue d'un sport d'endurance comme le triathlon, et peuvent s'apparenter à la notion de cœur d'athlète. Des adaptations vasculaires sont également suggérées par ces résultats, qui pourraient contribuer au concept émergent d'artère d'athlète. Des études longitudinales complémentaires seraient utiles pour évaluer la dynamique de ce remodelage cardio-vasculaire à l'échelle d'une vie d'athlète ainsi que ses conséquences physiopathologiques éventuelles.

MOTS-CLES : compliance aortique ; entraînement ; IRM cardiovasculaire ; cœur d'athlète ; couplage ventriculo-aortique

Abstract

Analysis of training and functional consequences of cardiovascular remodeling studied by MRI in amateur long-distance triathletes

Triathlon is a fast-growing endurance sport known for its high cardiovascular demand. This paper focuses on the impact that long distance triathlon (half-ironman and above) can have on the cardiovascular system. This writing proposes a descriptive study of the triathletes' training and then an analysis of variations in aortic compliance and cardiac remodeling measured by cardiovascular MRI during the race season.

Thirty-four 19-39-year-old male long-distance triathletes (Tri) were included, as well as twenty-nine healthy sex- and age-matched volunteers who were insufficiently active (Ctrl) according to World Health Organization recommendations. Triathletes provided their training data through a dedicated diary. All volunteers completed three visits (V1, V2, V3) spread over the course of the race season. Each visit included an applanation tonometry and a cardiovascular MRI. This imaging modality allowed the measurement of aortic sections and right and left ventricular volumes.

For the year 2018, triathletes reported training on average 10.5 ± 2.4 hours per week. During the six months prior to the reference race, the average weekly training parameters were: training load = 3244 ± 2225 ; monotony = 1.14 ± 0.44 ; strain = 4070 ± 4252 ; fitness = -3610 ± 3967 . The compliance of the ascending aorta calculated with peripheral pulse pressure was significantly higher in the Tri group at V2 ($3.85 \pm 1.19 \cdot 10^{-2}$ vs. $3.25 \pm 0.88 \cdot 10^{-2}$ cm²/mmHg; $p = 0.032$) and at V3 ($3.85 \pm 1.09 \cdot 10^{-2}$ vs. $3.25 \pm 0.92 \cdot 10^{-2}$ cm²/mmHg; $p = 0.027$), with no longitudinal variation during the race season ($p = 0.465$). The majority of left and right ventricular volumes were significantly higher in the Tri group and for all three visits, but without significant longitudinal variation.

These results are in favour of the existence of stable but long-standing cardiac adaptations. They are linked to regular and sufficiently sustained practice of an endurance sport such as triathlon and may be related to the notion of athlete's heart. Vascular adaptations are also suggested by these results, which may contribute to the emerging concept of the athlete's artery. Further longitudinal studies would be useful to assess the dynamics of this cardiovascular remodeling over an athlete's lifetime and its possible pathophysiological consequences.

KEYWORDS: aortic compliance; training; cardiovascular MRI; athlete's heart; ventriculo-aortic coupling

Table des matières

LISTE DES FIGURES.....	23
LISTE DES TABLEAUX.....	31
LISTE DES ABREVIATIONS.....	37
INTRODUCTION GENERALE.....	43
PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS PERSONNELLES.....	47
PARTIE 1 : ETAT DE L'ART.....	53
I. Développement du triathlon et performances	53
A. Notion de sport d'endurance	53
B. Vers un sport d'endurance complet et en plein essor : le triathlon	56
C. Performances sportives et haut niveau	61
II. Pratique sportive et adaptations cardio-vasculaires : recherches initiales.....	65
A. Réflexion sur la classification des sports	65
B. Premiers éléments de recherche	69
C. Mise en évidence des adaptations cardiaques structurelles liées à l'exercice : le cœur d'athlète	71
III. Remodelage cardiaque et sport	73
A. Dénombrement	73
1. Fondements du remodelage cardiaque chez le sportif.....	73
2. Notion de remodelage mixte	74
B. Cœur d'athlète ou cardiomyopathie hypertrophique : quelles limites ?.....	77
C. Sport intensif et cardiopathies secondaires : quand le remodelage cardiaque va trop loin	82
1. Cardiopathies arythmogènes	82
2. Cardiopathies dilatées	84
3. Fibrose myocardique.....	86

IV.	Remodelage vasculaire et sport	89
A.	Notion de couplage ventriculo-aortique	89
B.	Vers l'existence d'un remodelage vasculaire	97
	Pour résumer cette première partie	109
PARTIE 2 : MATERIEL & METHODES.....		113
I.	Contexte de nos recherches.....	113
II.	Population étudiée.....	116
A.	Modalités de recrutement	116
B.	Sélection des volontaires.....	117
III.	Méthodologie de la recherche	120
A.	Critères d'évaluation	120
B.	Déroulement de la recherche	122
1.	Description de la recherche	122
2.	Description des règles de sortie d'étude.....	127
IV.	Caractéristiques des différents outils.....	129
A.	Questionnaires utilisés	129
1.	Questionnaire de vie sportive	129
2.	Agenda du sportif	134
B.	Acquisitions en tonométrie d'aplanation.....	139
1.	Principe de la tonométrie d'aplanation	139
2.	Dispositif SphygmoCor®	140
3.	Dispositif PulsePen®	143
C.	Acquisitions en IRM.....	146
1.	Principes méthodologiques de l'IRM cardiovasculaire	146
2.	Protocole IRM pour COATRI	160
3.	Méthodologie du post-traitement des IRM	166
V.	Analyses statistiques	172
	Pour résumer cette seconde partie.....	173

PARTIE 3 : RESULTATS.....	175
I. Caractéristiques générales de l'étude et des populations étudiées	175
A. Données globales de l'étude COATRI	175
B. Analyse des questionnaires de vie sportive	181
1. Analyse de la pratique sportive durant l'enfance et l'adolescence pour tous les volontaires.....	181
2. Analyse de la pratique sportive durant l'âge adulte pour tous les volontaires	187
3. Analyse de la pratique du triathlon dans le groupe triathlètes	190
II. Analyse des agendas d'entraînement des triathlètes	193
A. Analyse quantitative de l'entraînement.....	193
1. Analyse globale.....	193
2. Analyse par mois	200
B. Analyse qualitative de l'entraînement	220
1. Analyse globale.....	220
2. Analyse par mois	224
C. Analyse de la charge d'entraînement et de son monitoring.....	244
1. Analyse de la charge d'entraînement.....	244
2. Monitoring de l'entraînement.....	252
III. Paramètres issus des tonométries d'aplanation	261
A. Mesures de pression artérielle et de fréquence cardiaque	261
1. Mesures périphériques	261
2. Mesures centrales	264
B. Mesures de la vitesse de l'onde de pouls	267
IV. Paramètres issus de l'examen IRM	270
A. Mesure périphérique et comparaison des mesures de pression artérielle	270
1. Mesures périphériques	270
2. Comparaison des mesures de pression artérielle	273
B. Paramètres ventriculaires	275
1. Cœur gauche	275
2. Cœur droit	277
3. Débits aortiques	279
4. Mesures du T1	285

C.	Analyse des paramètres artériels	288
1.	Compliance artérielle centrale	288
2.	Compliance et résistance artérielles périphériques.....	296
D.	Analyse des paramètres du couplage ventriculo-aortique	298
	Pour résumer cette troisième partie.....	301
PARTIE 4 : DISCUSSION.....		305
I.	Population d'étude et méthodologie	305
A.	Sélection de nos volontaires	305
B.	Méthodologie de notre protocole.....	306
C.	Analyse de la pratique sportive passée	307
II.	Entraînement de nos triathlètes	309
A.	Environnement de notre analyse	309
1.	Réflexions autour de notre protocole	309
2.	Etude des données d'entraînement.....	310
3.	Éléments généraux de notre analyse	312
B.	Synthèse par discipline.....	313
1.	Natation.....	313
2.	Vélo.....	314
3.	Course à pied.....	315
4.	PPG et autres activités.....	315
C.	Synthèse par type de séance.....	316
D.	Monitoring de l'entraînement.....	318
1.	Paramètres individuels.....	318
2.	Paramètres composites.....	321
III.	Remodelage cardio-vasculaire chez nos triathlètes.....	324
A.	Remodelage vasculaire.....	324
1.	Variabilité de la pression artérielle	324
2.	Evaluation de la rigidité aortique	326
3.	Impact au niveau du réseau artériel périphérique.....	328
B.	Remodelage cardiaque.....	329
1.	Variations anatomiques et cavitaires du cœur	329
2.	Adaptation du travail cardiaque.....	331
C.	Couplage ventriculo-aortique.....	333

PARTIE 5 : CONCLUSIONS & PERSPECTIVES.....	337
ANNEXES.....	343
Annexe n°1 – Courrier d’information à destination des triathlètes de la Ligue Lorraine de triathlon	343
Annexe n°2 – Article de presse dans le cadre du recrutement de volontaires sains	344
Annexe n°3 – Poster de Camille HUYNH, présenté lors du 12 ^e congrès commun SFMES-SFTS en 2019	345
Annexe n°4 – Statistiques complémentaires : ANOVA.....	346
Annexe n°5 – Autres travaux d’encadrement	356
Annexe n°6 – Publications en tant que premier auteur.....	357
BIBLIOGRAPHIE.....	361

Liste des figures

Partie 1 – Etat de l’art

1-1	Avantages de l’activité physique régulière
1-2	Résumé des recommandations en matière d’activité physique pour les 18-64 ans
1-3	Pyramide des recommandations en matière d’activité physique pour la population générale
1-4	Répartition des différents types de licences au sein de la Fédération Française de Triathlon pour l’année 2019
1-5	Evolution du nombre de clubs labellisés FFTRI entre 1986 et 2019
1-6	Evolution du nombre de licenciés FFTRI entre 2000 et 2019
1-7	Evolution du nombre d’épreuves labellisées FFTRI entre 1994 et 2019
1-8	Evolution du nombre de pass compétition délivrés entre 1994 et 2019
1-9	Répartition des épreuves labellisées FFTRI en fonction de leur type pour la saison 2019
1-10	Classification des sports de Mitchell
1-11	Extrait de la 36 ^e conférence de Bethesda – chapitre sur les cardiopathies congénitales
1-12	Nouvelle classification des sports selon la <i>Task Force on sports cardiology and exercise</i> de l’ <i>European Society of Cardiology</i>
1-13	Photo d’un <i>handgrip</i>
1-14	Schématisation des remodelages cardiaques concentrique et excentrique
1-15	Illustration des différents types de remodelage cardiaque en fonction du sport pratiqué
1-16	Images échocardiographiques bidimensionnelles à cadre fixe obtenues lors de la diastole, et dessins schématiques correspondants d’un cycliste de 21 ans avec une paroi ventriculaire gauche normalement épaisse, et d’un canoéiste de 25 ans avec un épaissement de la paroi ventriculaire gauche
1-17	Exemple de deux courbes de <i>strain</i> en deux dimensions chez un athlète sain et chez un athlète atteint de cardiomyopathie hypertrophique
1-18	Association entre le niveau d’activité physique et le risque de fibrillation atriale chez les hommes et chez les femmes
1-19	Représentation d’un modèle Windkessel à trois éléments
1-20	Détermination des droites d’élastances ventriculaire et artérielle grâce aux courbes pression-volume du ventricule gauche, à différents niveaux de charge
1-21	Modélisation de la relation entre couplage ventriculo-artériel et FEVG, et entre efficacité mécanique du ventricule gauche et FEVG
1-22	Classification des anévrismes aortiques selon De Bakey et Stanford

Partie 2 – Matériel & Méthodes

2-1	Schéma théorique de l'étude COATRI avec illustration des hypothèses envisagées
2-2	Extrait du questionnaire de vie sportive – partie consacrée à l'identité du volontaire
2-3a	Extrait du questionnaire de vie sportive – partie consacrée à la vie sportive du volontaire durant l'enfance et l'adolescence
2-3b	Extrait du questionnaire de vie sportive – partie consacrée à la vie sportive du volontaire durant l'âge adulte
2-4	Extrait du questionnaire de vie sportive – partie consacrée à la pratique du triathlon chez les triathlètes uniquement
2-5	Extrait du compendium des activités physiques
2-6	Exemple de page non remplie de l'agenda du sportif
2-7	Echelle du <i>Rating of Perceived Exertion</i> (RPE) remise aux triathlètes lors de la visite d'inclusion
2-8	Photo d'une IRM 3T Prisma – Siemens
2-9	Image IRM d'une séquence de type écho de spin et de type écho de gradient
2-10	Illustration schématique de la physique d'une séquence écho de spin basique en imagerie cardiaque
2-11	Illustration schématique de la physique d'une séquence écho de gradient basique en imagerie cardiaque
2-12	Illustration de la récupération de l'inversion de magnétisation pour la cartographie T1
2-13	Cartographie T1 sur séquence MOLLI
2-14	Imagerie de l'aorte thoracique en séquence de flux 4D
2-15	Plans de coupe long axe recommandés pour l'imagerie du ventricule gauche
2-16	Planification des coupes en vue petit axe suivie des images correspondant aux neuf niveaux de coupe
2-17	Images IRM en coupes petit axe montrant la phase télésystolique et la phase télédiastolique du ventricule gauche
2-18	Capture d'écran partielle du logiciel SuiteHEART® pour la détermination des paramètres fonctionnels ventriculaires
2-19	Images IRM en coupes axiales de la surface de la racine aortique en diastole et en systole
2-20	Représentation de la région d'intérêt dans le septum interventriculaire au niveau de l'insertion du ventricule droit (à gauche), et au niveau de la lumière ventriculaire (à droite) dans le cadre des mesures de T1
2-21	Dispositif SphygmoCor® CvMS
2-22	Éléments constituant l'onde de pression artérielle
2-23	Panneau de contrôle de SphygmoCor® CvMS
2-24	Dispositif PulsePen®
2-25	Analyse d'une courbe de pression artérielle centrale avec le tonomètre d'aplanation PulsePen®, et données mesurées
2-26	Illustration du calcul de la vitesse de l'onde de pouls utilisant le dispositif PulsePen®

Partie 3 – Résultats

3-1	Répartition en pourcentage des différentes catégories socio-professionnelles dans notre population générale
3-2	Représentation du nombre de volontaires par catégorie socio-professionnelle et en fonction du groupe d'appartenance
3-3	Répartition en pourcentage du premier sport pratiqué dans l'enfance en fonction du type de pratique
3-4	Représentation du nombre de volontaires en fonction du premier sport pratiqué dans l'enfance et du groupe d'appartenance
3-5	Répartition en pourcentage du sport le plus longtemps pratiqué dans l'enfance et/ou l'adolescence en fonction du type de pratique
3-6	Représentation du nombre de volontaires en fonction du sport le plus longtemps pratiqué dans l'enfance et/ou l'adolescence et du groupe d'appartenance
3-7	Représentation des 82 réponses retenues pour les sports pratiqués pendant deux ans au moins à l'âge adulte (hors triathlon), en fonction du groupe d'appartenance
3-8	Répartition en pourcentage des triathlètes en fonction de leur âge de début de la pratique du triathlon
3-9	Répartition en pourcentage des triathlètes en fonction du volume horaire hebdomadaire d'entraînement déclaré pour l'année 2017
3-10	Répartition en pourcentage des triathlètes en fonction de leur performance moyenne sur distance M
3-11	a : Représentation du nombre total de séances d'entraînement rapportées, en fonction du type d'activité au cours de la période de suivi b : Répartition en pourcentage du nombre de séances d'entraînement rapportées, en fonction du type d'activité au cours de la période de suivi
3-12	a : Représentation du nombre moyen de séances d'entraînement par athlète et par type d'activité, au cours de la période de suivi b : Représentation de l'extrapolation du nombre moyen de séances d'entraînement en fonction du type d'activité, pour un athlète et pour un mois d'entraînement de quatre semaines
3-13	a : Représentation du volume d'entraînement rapporté, en fonction du type d'activité au cours de la période de suivi b : Répartition en pourcentage du volume d'entraînement rapporté, en fonction du type d'activité au cours de la période de suivi
3-14	Représentation de l'extrapolation du volume d'entraînement moyen par type d'activité, pour un athlète et pour un mois d'entraînement de quatre semaines
3-15	Représentation de la durée moyenne exprimée en minutes d'une séance d'entraînement, en fonction du type d'activité au cours de la période de suivi
3-16	Représentation du nombre de triathlètes ayant fourni des éléments d'entraînement en fonction du mois de suivi
3-17	a : Représentation du nombre de séances d'entraînement rapportées en fonction du mois de suivi b : Représentation de l'extrapolation du nombre moyen de séances d'entraînement pour un athlète et pour un mois d'entraînement de quatre semaines
3-18	Représentation de l'extrapolation du nombre moyen de compétitions courues par athlète en fonction du mois de suivi

3-19	<p>a : Représentation du nombre total de séances d'entraînement rapportées pour chacune des disciplines principales, en fonction du mois de suivi</p> <p>b : Représentation de l'extrapolation du nombre moyen de séances d'entraînement en fonction du mois de suivi et de la discipline étudiée, pour un athlète et pour un mois d'entraînement de quatre semaines</p>
3-20	<p>a : Représentation du nombre total de séances d'entraînement de natation rapportées en fonction du mois de suivi</p> <p>b : Représentation de l'extrapolation du nombre moyen de séances d'entraînement de natation en fonction du mois de suivi, pour un athlète et pour un mois d'entraînement de quatre semaines</p>
3-21	<p>a : Représentation du nombre total de séances d'entraînement de vélo rapportées en fonction du mois de suivi</p> <p>b : Représentation de l'extrapolation du nombre moyen de séances d'entraînement de vélo en fonction du mois de suivi, pour un athlète et pour un mois d'entraînement de quatre semaines</p>
3-22	<p>a : Représentation du nombre total de séances d'entraînement de course à pied rapportées en fonction du mois de suivi</p> <p>b : Représentation de l'extrapolation du nombre moyen de séances d'entraînement de course à pied en fonction du mois de suivi, pour un athlète et pour un mois d'entraînement de quatre semaines</p>
3-23	<p>a : Représentation du nombre total de séances d'entraînement pour les autres activités rapportées en fonction du mois de suivi</p> <p>b : Représentation de l'extrapolation du nombre moyen de séances d'entraînement pour les autres activités en fonction du mois de suivi, pour un athlète et pour un mois d'entraînement de quatre semaines</p>
3-24	<p>a : Représentation du volume d'entraînement total rapporté pour chacune des disciplines principales et en fonction du mois de suivi</p> <p>b : Représentation de l'extrapolation du volume d'entraînement moyen en fonction du mois de suivi et de la discipline étudiée, pour un athlète et pour un mois d'entraînement de quatre semaines</p> <p>c : Représentation de l'extrapolation du volume d'entraînement moyen sous forme de pourcentage de temps total passé, pour chaque discipline étudiée et en fonction du mois de suivi, pour un athlète et pour un mois d'entraînement de quatre semaines</p>
3-25	<p>a : Représentation du volume d'entraînement total de natation rapporté en fonction du mois de suivi</p> <p>b : Représentation de l'extrapolation du volume d'entraînement moyen de natation en fonction du mois de suivi, pour un athlète et pour un mois d'entraînement de quatre semaines</p>
3-26	<p>a : Représentation du volume d'entraînement total de vélo rapporté en fonction du mois de suivi</p> <p>b : Représentation de l'extrapolation du volume d'entraînement moyen de vélo en fonction du mois de suivi, pour un athlète et pour un mois d'entraînement de quatre semaines</p>
3-27	<p>a : Représentation du volume d'entraînement total de course à pied rapporté en fonction du mois de suivi</p> <p>b : Représentation de l'extrapolation du volume d'entraînement moyen de course à pied en fonction du mois de suivi, pour un athlète et pour un mois d'entraînement de quatre semaines</p>

3-28	<p>a : Représentation du volume d'entraînement total pour les autres activités rapporté en fonction du mois de suivi</p> <p>b : Représentation de l'extrapolation du volume d'entraînement moyen pour les autres activités en fonction du mois de suivi, pour un athlète et pour un mois d'entraînement de quatre semaines</p>
3-29	Représentation de la durée moyenne en minutes d'une séance de natation en fonction du mois de suivi
3-30	Représentation de la durée moyenne en minutes d'une séance de vélo en fonction du mois de suivi
3-31	Représentation de la durée moyenne en minutes d'une séance de course à pied en fonction du mois de suivi
3-32	Représentation de la durée moyenne en minutes d'une séance pour les autres activités en fonction du mois de suivi
3-33	Représentation du nombre de séances rapportées au cours de la période de suivi, en fonction du type de séance réalisé
3-34	Représentation du nombre de séances rapportées au cours de la période de suivi, en fonction du type de séance réalisé et de la discipline pratiquée
3-35	<p>a : Représentation du volume horaire d'entraînement rapporté au cours de la période de suivi, en fonction du type de séance réalisé</p> <p>b : Répartition en pourcentage de temps passé pour chaque type de séance au cours de la période de suivi</p>
3-36	<p>a : Représentation du volume horaire d'entraînement rapporté au cours de la période de suivi, en fonction du type de séance réalisé et de la discipline pratiquée</p> <p>b : Répartition en pourcentage de temps passé pour chaque type de séance au cours de la période de suivi, en fonction de la discipline pratiquée</p>
3-37	Représentation de l'estimation du volume d'entraînement moyen pour chaque type de séance et en fonction de la discipline pratiquée, pour un athlète et pour une semaine d'entraînement par mois au cours de la période de suivi
3-38	<p>a : Représentation du nombre total de séances d'entraînement rapportées en fonction du type de séance et du mois de suivi</p> <p>b : Représentation de l'extrapolation du nombre de séances en fonction du type de séance, pour un athlète et pour un mois d'entraînement de quatre semaines</p>
3-39	<p>a : Représentation du volume d'entraînement total en heures rapporté au cours de la période de suivi, en fonction du type de séance et du mois de suivi</p> <p>b : Représentation de l'extrapolation du volume d'entraînement en heures en fonction du type de séance et du mois de suivi, pour un athlète et pour un mois d'entraînement de quatre semaines</p> <p>c : Représentation de l'extrapolation du volume d'entraînement relatif en fonction du type de séance et du mois de suivi, pour un athlète et pour un mois d'entraînement de quatre semaines</p>

3-40	<p>a : Représentation pour la natation du volume horaire d'entraînement rapporté au cours de la période de suivi, en fonction du type de séance et du mois de suivi</p> <p>b : Représentation pour la natation de l'extrapolation du volume d'entraînement en heures en fonction du type de séance et du mois de suivi, pour un athlète et pour un mois d'entraînement de quatre semaines</p> <p>c : Représentation pour la natation de l'extrapolation du volume d'entraînement relatif en fonction du type de séance et du mois de suivi, pour un athlète et pour un mois d'entraînement de quatre semaines</p>
3-41	<p>a : Représentation pour le vélo du volume horaire d'entraînement rapporté au cours de la période de suivi, en fonction du type de séance et du mois de suivi</p> <p>b : Représentation pour le vélo de l'extrapolation du volume d'entraînement en heures en fonction du type de séance et du mois de suivi, pour un athlète et pour un mois d'entraînement de quatre semaines</p> <p>c : Représentation pour le vélo de l'extrapolation du volume d'entraînement relatif en fonction du type de séance et du mois de suivi, pour un athlète et pour un mois d'entraînement de quatre semaines</p>
3-42	<p>a : Représentation pour la course à pied du volume horaire d'entraînement rapporté au cours de la période de suivi, en fonction du type de séance et du mois de suivi</p> <p>b : Représentation pour la course à pied de l'extrapolation du volume d'entraînement en heures en fonction du type de séance et du mois de suivi, pour un athlète et pour un mois d'entraînement de quatre semaines</p> <p>c : Représentation pour la course à pied de l'extrapolation du volume d'entraînement relatif en fonction du type de séance et du mois de suivi, pour un athlète et pour un mois d'entraînement de quatre semaines</p>
3-43	Représentation de l'extrapolation du volume d'entraînement en heures (à gauche) et de la proportion de temps passé (à droite), pour chaque discipline et en fonction du mois de suivi, pour un athlète et pour un mois d'entraînement de quatre semaines
3-44	Représentation de l'évolution de la durée moyenne en minutes d'une séance d'entraînement au cours de la période de suivi, en fonction du type de séance et indépendamment de la discipline pratiquée
3-45	Représentation de l'évolution de la durée moyenne en minutes d'une séance d'entraînement au cours de la période de suivi, en fonction du type de séance et de la discipline pratiquée
3-46	Evolution du nombre de séances hebdomadaires observé par les triathlètes en fonction du mois de suivi
3-47	Evolution du nombre de jours de repos hebdomadaires observés par les triathlètes en fonction du mois de suivi
3-48	Evolution du nombre de séances quotidiennes observé par les triathlètes en fonction du mois de suivi et ce, par jour d'entraînement et par jour de semaine (jour de repos y compris)
3-49	Evolution du volume d'entraînement hebdomadaire en minutes observé par les triathlètes en fonction du mois de suivi

3-50	Evolution du volume d'entraînement quotidien en minutes observé par les triathlètes en fonction du mois de suivi et ce, par jour d'entraînement et par jour de semaine (jour de repos y compris)
3-51	Evolution de la durée d'une séance en minutes observée par les triathlètes en fonction du mois de suivi
3-52	Evolution du RPE par séance observé par les triathlètes en fonction du mois de suivi
3-53	Evolution du sRPE par séance observé par les triathlètes en fonction du mois de suivi
3-54	Evolution du sRPE observé par les triathlètes en fonction du mois de suivi et ce, par jour d'entraînement et par jour de semaine (jour de repos y compris)
3-55	a : Evolution du <i>weekly training load</i> moyen observé chez les triathlètes en fonction du mois de suivi b : Représentation de l'évolution du <i>weekly training load</i> au cours de la période de suivi pour plusieurs profils de triathlètes
3-56	a : Evolution de la <i>monotony</i> hebdomadaire moyenne observée chez les triathlètes en fonction du mois de suivi b : Représentation de l'évolution de la <i>monotony</i> au cours de la période de suivi pour plusieurs profils de triathlètes
3-57	a : Evolution du <i>strain</i> hebdomadaire moyen observé chez les triathlètes en fonction du mois de suivi b : Représentation de l'évolution du <i>strain</i> au cours de la période de suivi pour plusieurs profils de triathlètes
3-58	a : Evolution du <i>fitness</i> moyen observé chez les triathlètes en fonction du mois de suivi b : Représentation de l'évolution du <i>fitness</i> au cours de la période de suivi pour plusieurs profils de triathlètes

Liste des tableaux

Partie 1 – Etat de l’art

1-1	Vitesses de course lors des différentes épreuves de triathlon mais également de natation, cyclisme et course à pied seules, pour les grandes échéances internationales 2016 et 2019
1-2	Répercussions cardio-vasculaires d’un exercice dynamique ou statique
1-3	Diamètres aortiques indexés sur la surface corporelle, et stratifiés selon l’âge et le genre

Partie 2 – Matériels & méthodes

2-1	Tableau d’appariement sur l’année de naissance entre les volontaires du groupe triathlète et les volontaires du groupe contrôle
2-2	<i>Flowchart</i> de la recherche
2-3	Protocole de l’étude COATRI, rédigé à l’attention des manipulateurs IRM et complété par nos soins

Partie 3 – Résultats

3-1	Périodes de réalisation des différentes visites en fonction du groupe d’étude
3-2	Durées moyennes, minimales et maximales entre deux visites pour chaque groupe d’étude
3-3	a : Comparaison des caractéristiques anthropométriques entre les deux groupes d’étude et en fonction du numéro de visite b : Comparaison longitudinale des caractéristiques anthropométriques en fonction du groupe d’étude
3-4	Tableau de correspondance entre la catégorie socio-professionnelle et sa référence chiffrée

3-5	Recensement des sports pratiqués par l'ensemble des volontaires en tant que premier sport pratiqué dans l'enfance
3-6	Recensement des sports pratiqués par l'ensemble des volontaires en tant que sport le plus longtemps pratiqué dans l'enfance et/ou l'adolescence
3-7	Comparaison quantitative de la pratique sportive dans l'enfance et l'adolescence entre les triathlètes et les témoins
3-8	Recensement des sports pratiqués par l'ensemble des volontaires pendant au moins deux ans à l'âge adulte
3-9	Comparaison quantitative de la pratique sportive à l'âge adulte entre les triathlètes et les témoins (hors triathlon)
3-10	Caractéristiques quantitatives de la pratique du triathlon chez les triathlètes, depuis le début de leur pratique de la discipline jusqu'en 2017 inclus
3-11	Répartition du nombre de séances rapportées par secteur d'activité, y compris en pourcentage du nombre total, au cours de la période de suivi
3-12	Répartition du volume d'entraînement rapporté par secteur d'activité, y compris en pourcentage du volume total, au cours de la période de suivi
3-13	Répartition du nombre d'exams de tonométrie étudiés en fonction du groupe d'étude et du numéro de visite
3-14	a : Comparaison entre les deux groupes d'étude des paramètres périphériques mesurés en prévision de la tonométrie d'aplanation, en fonction du numéro de visite b : Comparaison longitudinale pour chaque groupe d'étude, des paramètres périphériques mesurés en prévision de la tonométrie d'aplanation c : Comparaison deux à deux des paramètres périphériques mesurés en prévision de la tonométrie d'aplanation, dont l'évolution longitudinale s'est avérée précédemment significative
3-15	a : Comparaison entre les deux groupes d'étude des paramètres centraux mesurés avec le tonomètre d'aplanation SphygmoCor®, en fonction du numéro de visite b : Comparaison longitudinale pour chaque groupe d'étude, des paramètres centraux mesurés avec le tonomètre d'aplanation SphygmoCor® c : Comparaison deux à deux des paramètres centraux mesurés avec le tonomètre d'aplanation SphygmoCor®, dont l'évolution longitudinale s'est avérée précédemment significative
3-16	a : Comparaison entre les deux groupes d'étude des vitesses de l'onde de pouls mesurées avec les tonomètres d'aplanation SphygmoCor® et PulsePen®, en fonction du numéro de visite b : Comparaison longitudinale pour chaque groupe d'étude, des vitesses de l'onde de pouls mesurées avec les tonomètres d'aplanation SphygmoCor® et PulsePen® c : Comparaison deux à deux des vitesses de l'onde de pouls mesurées avec les tonomètres d'aplanation SphygmoCor® et PulsePen®, dont l'évolution longitudinale s'est avérée précédemment significative
3-17	Répartition du nombre d'IRM étudiées en fonction du groupe d'étude et du numéro de visite

3-18	<p>a : Comparaison entre les deux groupes d'étude des pressions artérielles périphériques et de la fréquence cardiaque mesurées dans l'IRM, en fonction du numéro de visite</p> <p>b : Comparaison longitudinale pour chaque groupe d'étude, des pressions artérielles périphériques et de la fréquence cardiaque mesurées dans l'IRM</p> <p>c : Comparaison deux à deux des pressions artérielles et de la fréquence cardiaque mesurées dans l'IRM, dont l'évolution longitudinale s'est avérée précédemment significative</p>
3-19	<p>a : Comparaison de l'ensemble des mesures de pression artérielle brachiale réalisées dans l'IRM et au moment de la tonométrie</p> <p>b : Comparaison de l'ensemble des mesures de pression artérielle brachiale réalisées dans l'IRM et de l'ensemble des pressions artérielles centrales mesurées par le tonomètre d'aplanation SphygmoCor®</p> <p>c : Comparaison de l'ensemble des mesures de pression artérielle brachiale au moment de la tonométrie et l'ensemble des pressions artérielles centrales mesurées par le tonomètre d'aplanation SphygmoCor®</p>
3-20	<p>a : Comparaison entre les deux groupes d'étude des mesures intéressant le ventricule gauche, en fonction du numéro de visite</p> <p>b : Comparaison longitudinale pour chaque groupe d'étude, des mesures intéressant le ventricule gauche</p>
3-21	<p>a : Comparaison entre les deux groupes d'étude des mesures intéressant le ventricule droit, en fonction du numéro de visite</p> <p>b : Comparaison longitudinale pour chaque groupe d'étude, des mesures intéressant le ventricule droit</p>
3-22	<p>a : Comparaison entre les deux groupes d'étude des fréquences cardiaques mesurées dans l'IRM avant et après l'effort, en fonction du numéro de visite</p> <p>b : Comparaison longitudinale pour chaque groupe d'étude, des fréquences cardiaques mesurées dans l'IRM avant et après l'effort</p> <p>c : Comparaison deux à deux des fréquences cardiaques mesurées dans l'IRM avant et après effort, dont l'évolution longitudinale s'est avérée précédemment significative</p>
3-23	<p>a : Comparaison entre les deux groupes d'étude des débits aortiques exprimés en mL/batt, en fonction du numéro de visite</p> <p>b : Comparaison longitudinale pour chaque groupe d'étude, des débits aortiques exprimés en mL/batt</p> <p>c : Comparaison deux à deux des débits aortiques exprimés en mL/batt, dont l'évolution longitudinale s'est avérée précédemment significative</p>
3-24	<p>a : Comparaison entre les deux groupes d'étude des débits aortiques exprimés en L/min, en fonction du numéro de visite</p> <p>b : Comparaison longitudinale pour chaque groupe d'étude, des débits aortiques exprimés en L/min</p>

3-25	<p>a : Comparaison entre les deux groupes d'étude des mesures du T1, en fonction du numéro de visite</p> <p>b : Comparaison longitudinale pour chaque groupe d'étude, des mesures du T1</p> <p>c : Comparaison deux à deux des mesures du T1, dont l'évolution longitudinale s'est avérée précédemment significative</p>
3-26	<p>a : Comparaison entre les deux groupes d'étude des sections de l'aorte thoracique ascendante, en fonction du numéro de visite</p> <p>b : Comparaison longitudinale pour chaque groupe d'étude, des sections de l'aorte thoracique ascendante</p>
3-27	<p>a : Comparaison entre les deux groupes d'étude des compliances et des distensibilités de l'aorte thoracique ascendante, en fonction du numéro de visite</p> <p>b : Comparaison longitudinale pour chaque groupe d'étude, des compliances et des distensibilités de l'aorte thoracique ascendante</p>
3-28	<p>a : Comparaison entre les deux groupes d'étude des sections de l'aorte thoracique descendante, en fonction du numéro de visite</p> <p>b : Comparaison longitudinale pour chaque groupe d'étude, des sections de l'aorte thoracique descendante</p>
3-29	<p>a : Comparaison entre les deux groupes d'étude des compliances et des distensibilités de l'aorte thoracique descendante, en fonction du numéro de visite</p> <p>b : Comparaison longitudinale pour chaque groupe d'étude, des compliances et des distensibilités de l'aorte thoracique descendante</p>
3-30	<p>a : Comparaison entre les deux groupes d'étude des compliances et résistance artérielles totales, en fonction du numéro de visite</p> <p>b : Comparaison longitudinale pour chaque groupe d'étude, des compliances et résistance artérielles totales</p>
3-31	<p>a : Comparaison entre les deux groupes d'étude des paramètres du travail cardiaque, en fonction du numéro de visite</p> <p>b : Comparaison longitudinale pour chaque groupe d'étude, des paramètres du travail cardiaque</p>
3-32	<p>a : Comparaison entre les deux groupes d'étude des paramètres du couplage ventriculo-aortique, en fonction du numéro de visite</p> <p>b : Comparaison longitudinale pour chaque groupe d'étude, des paramètres du couplage ventriculo-aortique</p>

Liste des abréviations

1,5T / 3T	1,5 Tesla / 3 Tesla
2D/3D/4D	2 dimensions / 3 dimensions / 4 dimensions
ALFW	<i>anterolateral free wall</i>
AML	<i>anterior mitral leaflet</i>
Ant. VS	<i>anterior ventricular septum</i>
Ao	<i>Aorta</i>
Aomax	section aortique maximale
Aomin	section aortique minimale
AS	<i>aortic stenosis</i>
BNP	peptide natriurétique de type B
BSA	<i>body surface area</i>
bSSFP	<i>balanced Steady-State Free Precession</i>
C	Compliance
c	Centrale
CHRU	Centre Hospitalier Régional Universitaire
CIC-IT	Centre d'Investigation Clinique – Innovation Technologique
CMD	cardiomyopathie dilatée
CMH	cardiomyopathie hypertrophique
CMHNO	cardiomyopathie hypertrophique non obstructive
CMR	imagerie par résonance magnétique cardio-vasculaire
COATRI	COmpliance Aortique chez le TRIathlète
CONADET	COmité NAional pour le DEveloppement du Triathlon
Couplage VA	couplage ventriculo-aortique
CPP	comité de protection des personnes
CPRC	contrat de programme de recherche clinique
D	diamètre moyen du vaisseau étudié
Da	distensibilité aortique
DAVD	dysplasie arythmogène du ventricule droit
Débit Ao	débit aortique
DES	diplôme d'études spécialisées
DESC	diplôme d'études spécialisées complémentaire
DO	distance olympique
E	module élastique du vaisseau étudié
Ea	élastance artérielle
EACVI	<i>European Association of Cardiovascular Imaging</i>
ECG	Electrocardiogramme
Ees	élastance télésystolique ventriculaire
EI/EIG	événement indésirable / événement indésirable grave
Ep*	module carotidien de Peterson
Ep	épaisseur de coupe
EPR	épaisseur de paroi relative
ESC	<i>European Society of Cardiology</i>

Ev	élastance ventriculaire
FA	fibrillation atriale
FC	fréquence cardiaque
FEVG	fraction d'éjection du ventricule gauche
FFTRI	Fédération Française de Triathlon
<i>FITT</i>	<i>frequency, intensity, time and type</i>
FOV	<i>field of view</i> = champ de vue
GA	grand axe
GIRCI	Groupe Interrégional de Recherche Clinique et d'Innovation
GLS	<i>global longitudinal strain</i>
Gss	gradient de sélection de coupe
Gφ	gradient de codage de phase
Gω	gradient de champ magnétique
h	épaisseur pariétale du vaisseau étudié
IADI	Imagerie Adaptative Diagnostique et Interventionnelle
IC	index cardiaque
IM	Ironman = 3,9 km de natation + 180 km de vélo + 42 km de course à pied
IMC	indice de masse corporelle
INSEE	Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques
INSEP	Institut National du Sport, de l'Expertise et de la Performance
IQR	<i>interquartile range</i>
IRM	imagerie par résonance magnétique
LA	<i>left atrium</i>
LGE	<i>late gadolinium enhancement</i>
LV	<i>left ventricle</i>
LVED	<i>left ventricular end-diastole</i>
<i>LVIDD</i>	<i>left ventricular internal dimension at end diastole</i>
M. dorsal	muscle dorsal
M. pectoral	muscle pectoral
MD	<i>mechanical dispersion</i>
MET	<i>metabolic equivalent of task</i>
MOLLI	<i>modified look locker inversion recovery</i>
Nb	Nombre
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
P	pression aortique
p	périphérique
P augmentée	pression augmentée
PA	petit axe (IRM)
PA	pression artérielle
PAD	pression artérielle diastolique
PAM	pression artérielle moyenne
PAMd	pression artérielle moyenne diastolique
PAMs	pression artérielle moyenne systolique
PAS	pression artérielle systolique
PAT	<i>parallel acquisition technology</i>
PC-CMR	<i>phase-contrast cardiovascular magnetic resonance imaging</i>
Pes	pression au sein du ventricule en fin de systole
PMA	puissance maximale aérobie
Post. VS	<i>posterior ventricular septum</i>
PP	pression pulsée

PPG	préparation physique généralisée
PW	<i>posterior wall</i>
PWV	<i>pulse wave velocity</i>
Q	débit cardiaque
r	rayon du vaisseau étudié
R	action réalisée spécifiquement pour les besoins de la recherche
R1	impédance caractéristique
R2	résistance périphérique
RF	Radiofréquence
ROI	<i>region of interest</i>
RPE	<i>rating of perceived exertion</i>
RSCA	récit de situation complexe authentique
RV	<i>right ventricle</i>
RVC	<i>right ventricular cavity</i>
Sang ventri.	sang ventriculaire
SCMR	<i>Society for Cardiovascular Magnetic Resonance</i>
Septum IV	septum interventriculaire
Septum/VD	zone de jonction entre le septum interventriculaire et le ventricule droit
SFMES	Société Française de Médecine de l'Exercice et du Sport
SFTS	Société Française de Traumatologie du Sport
SNR	rapport signal sur bruit
sRPE	charge d'entraînement d'une séance = RPE x durée de la séance en minutes
SSFP	<i>steady-state free precession</i>
SV	<i>stroke volume</i>
T	Temps
TAC	<i>total arterial compliance</i>
TE	temps d'écho
TPVR	<i>total peripheric vascular resistance</i>
TR	temps de répétition
TRIMPS	<i>training impulse</i>
UNSS	Union Nationale du Sport Scolaire
USA	<i>United States of America</i>
V°	= intersection de la droite $Pes = Ees(Ves - V^\circ)$ avec l'axe des abscisses
V1, V2, V3	visite n°1, visite n°2, visite n°3
VD	ventricule droit
VE	volume d'éjection
Ved	volume du ventricule en fin de diastole
Venc	vitesse d'encodage
Ves	volume au sein du ventricule en fin de systole
VES	volume d'éjection systolique
VG	ventricule gauche
VMA	vitesse maximale aérobie
VO ₂	consommation en oxygène
VO ₂ max	consommation maximale en oxygène
VOP	vitesse de l'onde de pouls
VS	<i>ventricular septum</i>
VTD	volume télédiastolique
VTS	volume télésystolique
VTT	vélo tout terrain
WSS	<i>wall shear stress</i>

<i>WT</i>	<i>World Triathlon (ex-International Triathlon Union)</i>
<i>WTL</i>	<i>weekly training load</i>
ΔD	variation de diamètre du vaisseau étudié à chaque cycle cardiaque
Δd	longueur d'un segment vasculaire étudié
ΔP	variation de pression à chaque cycle cardiaque
Δt	temps de transit de l'onde de pouls
ρ	densité du sang
σ	écart-type

Introduction générale

Au cours des vingt dernières années, la Communauté Scientifique a publié de nombreuses études prouvant le bénéfice d'une activité physique adaptée, tant en prévention primaire qu'en prévention secondaire, en faveur notamment des sports d'endurance comme le cyclisme, la marche ou encore la natation. En parallèle, nous assistons à une véritable démocratisation de ce type de sports, et particulièrement pour les épreuves de longue durée comme le marathon, les trails longs ou encore le triathlon. Cette discipline, qui a le vent en poupe au vu des chiffres fournis par la Fédération Française de Triathlon, attire de plus en plus de personnes pour son format le plus long, à savoir l'Ironman et ses 3,9 km de natation + 180 km de vélo + 42 km de course à pied. Mais pour venir à bout d'une telle épreuve, il faut accumuler de nombreuses heures d'entraînement, ce qui ne reste pas sans conséquence pour le corps lorsque les cycles de préparation pour de tels objectifs de course se répètent dans le temps.

Nous savons que le sport peut être source de vieillissement précoce des articulations chez des personnes prédisposées à ce genre de pathologies. Or d'autres organes comme le cœur et les vaisseaux sanguins ne sont pas indemnes de l'impact que peut avoir le sport pratiqué avec assiduité et ancienneté. Depuis une cinquantaine d'années, de nombreux chercheurs œuvrent pour comprendre comment l'activité physique plus ou moins soutenue pousse le cœur et les vaisseaux à s'adapter à ce type de contrainte hémodynamique pour répondre à la demande métabolique exigée par l'effort sportif. Au vu de la place de plus en plus croissante que prend le sport dans notre société, et plus particulièrement le sport d'endurance, il nous a paru utile de nous y intéresser.

Nous avons donc souhaité associer plusieurs équipes pour répondre à cette question très générale : quel est l'impact du triathlon longue distance sur le système cardio-vasculaire ? Le laboratoire IADI – Imagerie Analytique Diagnostique et Interventionnelle, INSERM U1254, dirigé par le Pr Jacques FELBLINGER, a été au centre de ces travaux dans la mesure où nos recherches ont fait appel à l'imagerie par résonance magnétique (IRM) pour explorer selon plusieurs aspects les adaptations cardiaques et vasculaires induites par le triathlon. Le Pr Damien MANDRY, affilié au IADI et qui a codirigé cette thèse, a piloté toute la partie dédiée à l'IRM en sa qualité de radiologue référent en

imagerie cardio-vasculaire au CHRU de Nancy. La partie concernant la physiologie de l'exercice a été confiée quant à elle au Pr Mathias POUSSEL, médecin du sport au sein du Centre Universitaire de Médecine du Sport et d'Activité Physique Adaptée au CHRU de Nancy et affilié au laboratoire EA 3450 DevAH, qui a codirigé cette thèse. Afin de nous aider dans notre réflexion concernant les adaptations vasculaires liées à l'exercice, le Pr Laure JOLY, gériatre au sein du CHRU de Nancy, a accepté de nous aider au vu de son expertise dans l'étude de la rigidité artérielle au sein du laboratoire INSERM U1116. Enfin, le Dr Anne-Charlotte DUPONT, doctorante au sein du IADI et triathlète, s'est occupée de la partie dédiée au triathlon, en sa qualité de médecin du sport officiant également au sein des instances fédérales du triathlon.

Dans une première partie, nous commencerons avec quelques mots sur les sports d'endurance puis sur le triathlon. Nous parlerons développement de cette discipline et performance. Nous en viendrons ensuite à aborder comment la Communauté Scientifique a pu mettre en évidence les adaptations cardiaques induites par l'exercice, dénommées plus tard « cœur d'athlète ». Nous parlerons de remodelage cardiaque et de ses aspects pathologiques puis nous aborderons l'existence dans ce contexte d'un potentiel remodelage vasculaire associé.

Dans une seconde partie, nous détaillerons les aspects méthodologiques de notre étude. Nous expliquerons les raisons pour lesquelles nous avons défini notre protocole IRM de la sorte ainsi que le principe de fonctionnement et les paramètres attendus des tonomètres d'aplanation que nous avons utilisés. Nous aborderons également la manière dont nous avons voulu monitorer l'entraînement de nos triathlètes. La troisième partie portera sur les résultats de nos différentes manipulations.

Dans une quatrième partie, nous discuterons de nos résultats, positifs comme négatifs, et de leur interprétation tant sous un aspect transversal – triathlètes versus contrôles – que sous un aspect longitudinal – évolution d'un paramètre au cours de la période d'étude, ce qui fait de ce protocole une certaine forme d'originalité. Nous évoquerons les limites méthodologiques auxquelles nous avons dû faire face ainsi que des pistes d'amélioration pour des travaux complémentaires. Enfin, nous clorons ce manuscrit dans une cinquième partie avec une synthèse de nos conclusions et des perspectives évoquées par ce travail.

Publications et communications personnelles

Publications à comité de lecture international

From training to overtraining: the necessity of an integrated approach.

Dupont AC, Hossu G, Cherifi A, Beaumont M, Mandry D, Poussel M

Under reviewing in Science & Sports

A long duration race induces a decrease of left ventricular strains, twisting mechanics and myocardial work in trained adolescents.

Birat A, Ratel S, Dodu A, Grosseoeuvre C, **Dupont AC**, Rance M, Morel C, Nottin S

Under reviewing in Journal of Sport and Health Science

Impact of long-duration racing on hydration status, electrolytes and renal function in trained adolescent athletes.

Birat A, Garnier Y, Bourdier P, Dupuy A, Dodu A, Grosseoeuvre C, **Dupont AC**, Rance M, Morel C, Nottin S, Ratel S

Under reviewing in The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness

Cardiac events in world-class athletes: an internet-based study.

Le Douairon Lahaye S, Le Cunuder A, Lachard T, Menard V, Lhuissier F, **Dupont AC**, Wurtz AS, Marblé C, Carré F, Schnell F

Under reviewing in Medicine & Science in Sports & Exercise (MSSE)

Changes in pulmonary function after long-duration adventure racing in adolescent athletes.

Birat A, Garnier Y, Bourdier P, Dupuy A, Dodu A, Grosseoeuvre C, **Dupont AC**, Mucci P, Blazevich A, Rance M, Morel C, Nottin S, Ratel S

Under reviewing in International Journal of Sports Medicine

Neuromuscular Fatigue After Long-Duration Adventure Racing in Adolescent Athletes.

Birat A, Garnier YM, Bourdier P, Dupuy A, Dodu A, Grosseoeuvre C, **Dupont AC**, Blazevich AJ, Rance M, Morel C, Nottin S, Ratel S. *Pediatr Exerc Sci.* 2021 May 6:1-9. doi: 10.1123/pes.2020-0201. Online ahead of print. PMID: 33958502

Health Coaching Triathlon: A Model of Involvement in a Sports Federation.

Coste O, Lieux R, Gremeaux-Bader V, **Dupont AC**, Marblé C. *Dtsch Z Sportmed.* 2020;71:258-262. doi:10.5960/dzsm.2020.460

Effect of Long-Duration Adventure Races on Cardiac Damage Biomarker Release and Muscular Function in Young Athletes.

Birat A, Bourdier P, Dodu A, Grosseoeuvre C, Blazeovich AJ, Amiot V, **Dupont AC**, Nottin S, Ratel S. *Front Physiol.* 2020 Feb 5;11:10. doi: 10.3389/fphys.2020.00010. eCollection 2020. PMID: 32116738

Aortic compliance variation in long male distance triathletes: A new insight into the athlete's artery?

Dupont AC, Poussel M, Hossu G, Marie PY, Chenuel B, Felblinger J, Mandry D. *J Sci Med Sport.* 2017 Jun;20(6):539-542. doi: 10.1016/j.jsams.2016.10.009. Epub 2016 Oct 29. PMID: 27838232

Publications en dehors des revues à comité de lecture

Lieux R, **Dupont AC**, Coste O. (2021). **La place de la médecine de la fédération dans le courant sport-santé.** Dans Depiesse, F., Coste, O. et Marblé, C. (dir.), *Médecine du triathlon – pratiques, recommandations, prévention.* Elsevier-Masson.

Dupont AC, Marblé C, Coste O. (2021). **Introduction et histoire du sport et de la médecine au sein de la fédération.** Dans Depiesse, F., Coste, O. et Marblé, C. (dir.), *Médecine du triathlon – pratiques, recommandations, prévention.* Elsevier-Masson.

Fibres musculaires et sport : quel type pour qui ?

Dupont AC. Article pour le blog de www.drssport.fr, paru en juin 2019

Peut-on faire du sport quand on souffre d'arthrose ?

Dupont AC. Article pour le journal *Le Républicain Lorrain*, paru en novembre 2018

Importance de réaliser un bilan cardio-vasculaire avant de reprendre une activité sportive.

Dupont AC. Article pour le numéro Hors-Série spécial *Triathlon 2018* du magazine *Sport Santé*

Conseils pour pratiquer le triathlon en cas de pathologie chronique associée.

Dupont AC, Coste O. Article pour le numéro Hors-Série spécial *Triathlon 2018* du magazine *Sport Santé*

Qu'est-ce qu'un triathlon Ironman ?

Dupont AC. Article pour le blog de www.drssport.fr, paru en mai 2018

Pour ou contre l'entraînement à jeun ?

Dupont AC. Article pour le journal *L'Est Républicain*, paru en avril 2018

Les dangers des courses de l'extrême.

Dupont AC. Article pour le blog de www.drssport.fr, paru en avril 2018

Quel sport pratiquer quand on souffre de lombalgies ?

Dupont AC. Article pour le blog de www.drssport.fr, paru en février 2018

Quel sport pratiquer quand on souffre de gonalgies ?

Dupont AC. Article pour le blog de www.drssport.fr, paru en février 2018

Tour d'horizon sur les tendinopathies.

Dupont AC. Article pour le numéro Hors-Série spécial Triathlon 2017 du magazine Sport Santé

Communications orales et affichées

Impact of an online training program without equipment (FREELETICS®) on the physical condition in adults: comparative study on the weight and on the maximal oxygen consumption during exercise (VO₂max).

Dupont AC, Lalevée V, Poussel M. *Communication affichée présentée lors de 11th EFSMA Congress of Sports Medicine – 2019, Portoroz (SLO)*

Effect of adventure races on cardiac damage and muscular function in young athletes.

Birat A, Bourdier P, Dodu A, Grosseuvre C, Blazeovich AJ, Amiot V, **Dupont AC,** Nottin S, Ratel S. *Communication affichée + Young Investigator Award for the best poster, présentée lors de 11th EFSMA Congress of Sports Medicine – 2019, Portoroz (SLO)*

Impact d'un programme d'entraînement en ligne (FREELETICS®) sur la condition physique chez des adultes : étude comparative préliminaire de la perte de poids et de l'amélioration de la VO₂.

Dupont AC, Lalevée V, Poussel M. *Communication affichée présentée lors du 12e Congrès Commun SFMES-SFTS – 2019, Reims (FRA)*

Etude comparative de la pratique sportive débutée dans l'enfance d'une population de triathlètes adultes amateurs longue distance par rapport à sa population témoin appariée.

Huynh C, Cherifi A, Joly L, Hossu G, Poussel M, Mandry D, **Dupont AC.** *Communication affichée + Prix de la SFMES – meilleure communication affichée, présentée lors du 12e Congrès Commun SFMES-SFTS – 2019, Reims (FRA)*

Pratique sportive et pathologies cardiaques : quels sont les sports les plus à risque ?

Le Douairon Lahaye S, Schnell F, Lachard T, Lhuissier F, **Dupont AC,** Wurtz AS, Marblé C, Carré F. *Communication affichée présentée lors du 12e Congrès Commun SFMES-SFTS – 2019, Reims (FRA)*

Sport intense et risques médicaux.

Dupont AC. *Conférence-débat pour le Club 51 de Thionville – 2018, Thionville (FRA)*

Ventriculo-aortic coupling studied by cardiac MRI – A study in long distance triathletes

Dupont AC, Poussel M, Hossu, G, Marie PY, Chenuel B, Felblinger J, Mandry D. *Communication affichée + Best poster Price – category Undergraduate, présentée lors de 2017 ITU Science+Triathlon World Conference – 2017, Edmonton (CAN)*

Le triathlon : sport santé par excellence ?

Dupont AC. *Communication orale présentée lors de la session « Carte Blanche à la Fédération Française de Triathlon » lors du 10e Congrès Commun SFMES-SFTS + modération de cette même séance – 2017, Marseille (FRA)*

Etude du couplage ventriculo-aortique en IRM chez le triathlète amateur longue distance.

Dupont AC, Poussel M, Hossu G, Marie PY, Chenuel B, Felblinger J, Mandry D. *Communication orale présentée en anglais lors de 38th World Medical & Health Games, & International Sport Medicine Symposium – 2017, Marseille (FRA)*

Bienfaits des sports d'endurance.

Dupont AC. *Conférence-débat publique au Centre de Préparation Omnisports de Vittel dans le cadre du Tour de France 2017 – 2017, Vittel (FRA)*

Activité physique adaptée et santé.

Dupont AC. *Communication orale lors de l'Assemblée Générale du Club Cœur et Santé de Saint-Dié-des-Vosges – 2017, Saint-Dié-des-Vosges (FRA)*

Partie 1 : Etat de l'art

Au cours de ces travaux de thèse, nous nous sommes intéressés à l'impact sur le système cardio-vasculaire d'un sport d'endurance en pleine expansion, à savoir le triathlon. Plus particulièrement, nous nous sommes focalisés sur l'impact que peut avoir le triathlon longue distance, au vu des nombreuses heures d'entraînement que ce format de course exige. Au cours de travaux de recherche préliminaires débutés en 2014 dans le cadre du Master 2 du Dr Anne-Charlotte DUPONT, nous avons pu mettre en évidence, outre un remodelage cardiaque en faveur du concept de cœur d'athlète chez nos volontaires sportifs, une différence de compliance aortique entre nos triathlètes et leurs contrôles appariés au cours de la seconde visite uniquement (1). Nous avons alors formulé l'hypothèse que la rigidité artérielle avait diminué chez les individus entraînés en endurance du fait possiblement de l'intensification de leur entraînement entre les deux visites. Nous souhaitons donc comprendre davantage comment un sport d'endurance comme le triathlon peut moduler le remodelage cardio-vasculaire et si la structure de l'entraînement a un rôle à jouer.

I. Développement du triathlon et performances

A. Notion de sport d'endurance

Durant les trois dernières décennies, nous avons assisté à un intérêt croissant des sportifs, plus ou moins assidus, pour les sports d'endurance. D'ailleurs, qu'est-ce qu'un sport d'endurance après tout ? Selon la définition du dictionnaire Larousse, l'endurance est l'aptitude à résister aux fatigues physiques ou aux épreuves morales (2). L'endurance, c'est aussi la capacité à effectuer un travail sur une période prolongée. Les sports d'endurance sont donc ceux qui vont être pratiqués sur des durées relativement longues comme la course à pied, le cyclisme, l'aviron, la marche nordique, la randonnée ... L'avantage de ces sports est que, pour pouvoir durer dans le temps, il ne faut pas que l'effort soit trop intense et donc que l'état de fatigue soit trop précoce. Il a

d'ailleurs été démontré dans de nombreuses études l'intérêt de pratiquer une activité physique régulière et adaptée (3) pour ses nombreux bienfaits en matière de santé, y compris en cas de pathologies chroniques (4) ou de cancer (5). Ces bénéfices sont résumés en partie via la **figure 1-1**.

Figure 1-1. Avantages de l'activité physique régulière (Source www.nutriandmore.com)



Toutefois, pour un athlète, l'endurance c'est la capacité à résister à la fatigue engendrée par un effort sportif de longue durée. On distingue alors deux types d'endurance : l'endurance musculaire et l'endurance cardio-vasculaire (6). C'est d'ailleurs ce second aspect qui va davantage nous intéresser. Comme évoqué ci-dessus, il a été démontré par de nombreux travaux que les sports d'endurance ont un impact positif sur la santé cardio-vasculaire (7). En effet, l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) recommande entre autres de pratiquer au moins 150 minutes par semaine une activité physique d'intensité modérée (8), comme la marche rapide ou le footing, le cyclisme loisir ou encore la natation d'entretien. L'ensemble de ces recommandations pour les adultes de 18 à 64 ans sont résumées dans l'encadré ci-dessous (**figure 1-2**).

Figure 1-2. Résumé des recommandations en matière d'activité physique pour les 18-64 ans, d'après *Recommandations mondiales sur l'activité physique pour la santé* – page 26, 2010 (8)

1. Les adultes âgés de 18 à 64 ans devraient pratiquer au moins, au cours de la semaine, 150 minutes d'activité d'endurance d'intensité modérée ou au moins 75 minutes d'activité d'endurance d'intensité soutenue, ou une combinaison équivalente d'activité d'intensité modérée et soutenue.
2. L'activité d'endurance devrait être pratiquée par périodes d'au moins 10 minutes.
3. Pour pouvoir en retirer des bénéfices supplémentaires sur le plan de la santé, les adultes devraient augmenter la durée de leur activité d'endurance d'intensité modérée de façon à atteindre 300 minutes par semaine ou pratiquer 150 minutes par semaine d'activité d'endurance d'intensité soutenue, ou une combinaison équivalente d'activité d'intensité modérée et soutenue.
4. Des exercices de renforcement musculaire faisant intervenir les principaux groupes musculaires devraient être pratiqués au moins deux jours par semaine.

Ces recommandations peuvent être illustrées différemment, sous la forme d'une pyramide un peu plus explicite au premier coup d'œil (figure 1-3).

Figure 1-3. Pyramide des recommandations en matière d'activité physique pour la population générale (Source www.paprica.ch21)

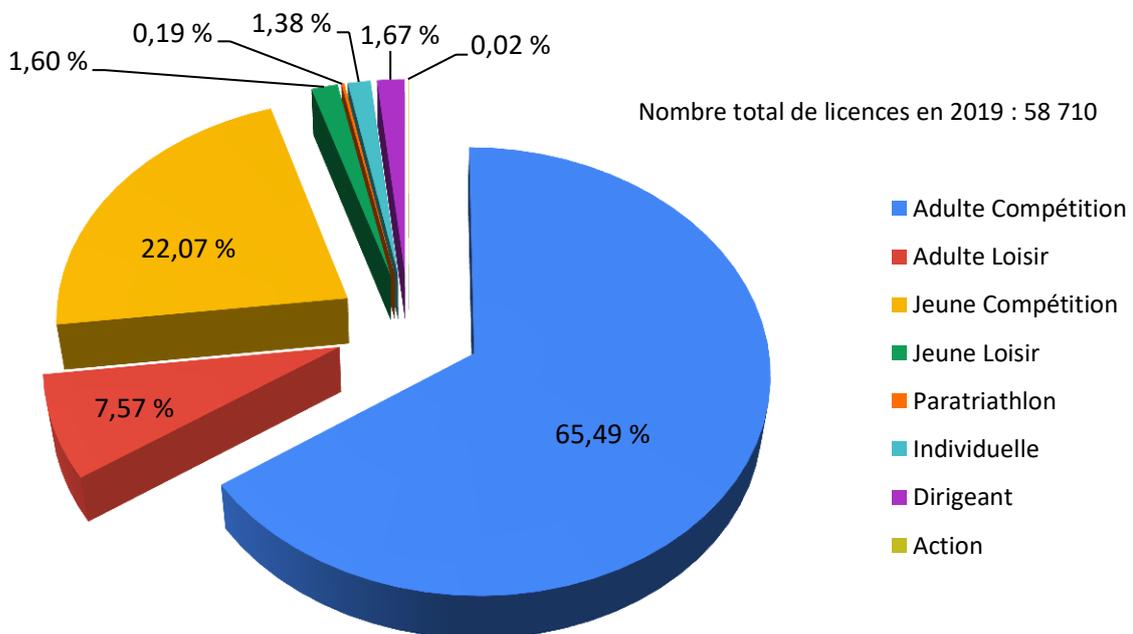


Nous nous sommes donc intéressés à un sport qui combine plusieurs de ces activités d'endurance et qui est en plein développement : le triathlon.

B. Vers un sport d'endurance complet et en plein essor : le triathlon

Le triathlon est une discipline sportive qui consiste à enchaîner sans pause, une épreuve de natation puis une épreuve de vélo avant de finir par une épreuve de course à pied. Bien que le triathlon trouve tout son sens dans sa pratique en compétition, il n'en demeure pas moins un sport accessible pour l'ensemble de la famille, que ce soit pour une pratique loisir ou encore à visée de « sport-santé », au vu de la **figure 1-4**. Cette dernière illustre la répartition des différents types de licences prises en 2019 au sein de la Fédération Française de Triathlon (FFTRI).

Figure 1-4. Répartition des différents types de licences au sein de la Fédération Française de Triathlon pour l'année 2019 (source FFTRI)



Mais pour celles et ceux qui veulent s'adonner à la compétition, les distances proposées balayent un large éventail de choix, allant de la compétition de quelques kilomètres pour le débutant, au format Ironman – la version « ultra » du triathlon – pour les plus téméraires qui souhaitent repousser leurs limites. On parle alors de course dite longue distance chez les initiés avec deux distances reines, à savoir le format L ou half-ironman (1900 m de natation, 90 km de vélo, 21 km de course à pied) et le format XXL ou ironman (3800 m de natation, 180 km de vélo, 42 km de course à pied), soit 8 à 16 h d'effort selon ses capacités pour ce dernier format.

Malgré une image un peu extrême que donne la lecture de ces chiffres, le triathlon est une discipline en plein essor, au vu du nombre croissant de clubs labellisés FFTRI (**figure 1-5**) et de licenciés de cette même fédération sportive (**figure 1-6**), créée en 1984 sous le nom de CONADET (COmité NATIONAL pour le DEveloppement du Triathlon) et devenue FFTRI (Fédération Française de TRIathlon) en 1989.

Figure 1-5. Evolution du nombre de clubs labellisés FFTRI entre 1986 et 2019 (source FFTRI)

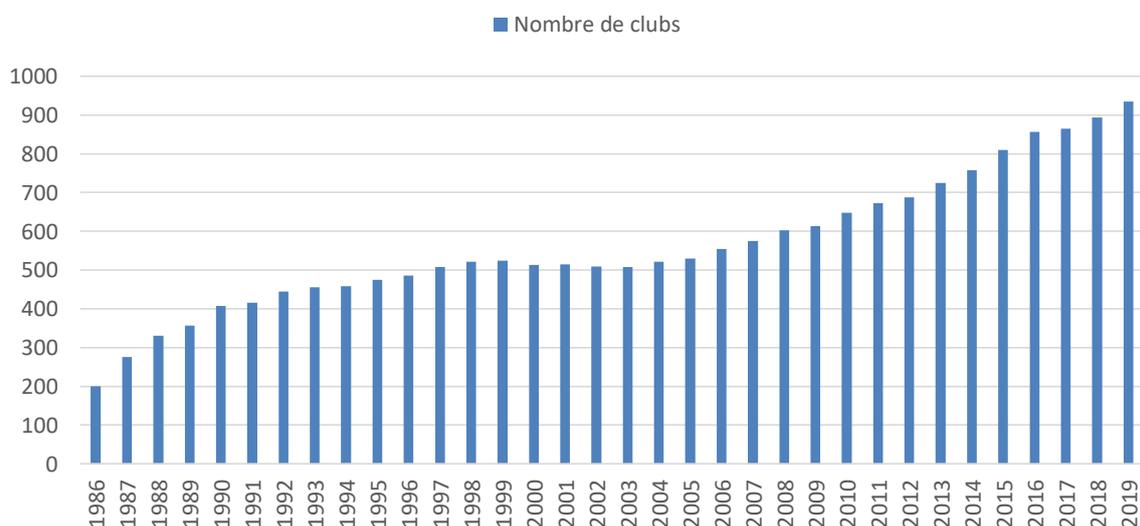
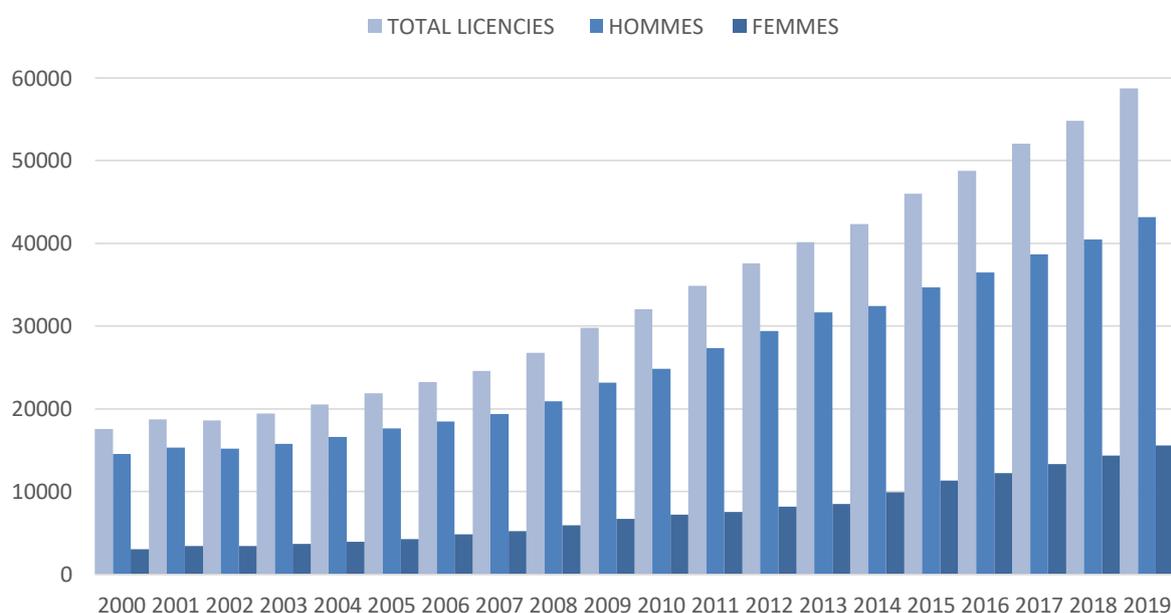


Figure 1-6. Evolution du nombre de licenciés FFTRI entre 2000 et 2019 (source FFTRI)



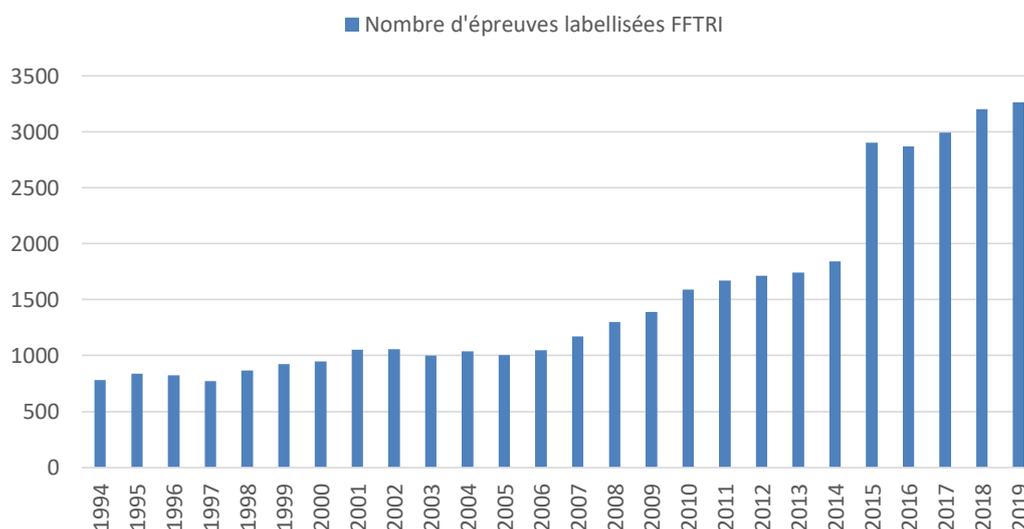
Néanmoins, il reste très compliqué d’obtenir des chiffres représentatifs de cet engouement pour les épreuves longue distance. Car elles sont nombreuses sur le territoire et même à travers le monde. Toutes ne sont pas forcément organisées sous l’égide d’une fédération, ce qui les rend difficile à répertorier scrupuleusement. Prenons par exemple le label IRONMAN® : c’est une entreprise privée, qui se dote de son propre circuit de compétition avec des championnats du monde indépendants de la gestion de la Fédération Internationale de Triathlon – devenue World Triathlon (WT) fin 2020.

En 2019, ce sont 46 épreuves au format Ironman qui se sont tenues à travers le monde pour environ 85 000 athlètes inscrits dont 19,3 % de femmes, ainsi que 120 épreuves au format half-Ironman pour 225 000 athlètes inscrits dont 26 % de femmes, toutes catégories confondues (professionnels/amateurs, hommes/femmes, catégories d’âge de 18 à 75 ans et même au-delà). La moyenne d’âge était d’ailleurs de 40 ans.

En France, toujours en 2019, nous comptons deux épreuves format Ironman avec un total de 4 436 athlètes inscrits et plus de 60 nationalités différentes (France, Royaume-Uni, Belgique, Italie, Espagne entre autres) et quatre épreuves format half-Ironman pour 10 247 athlètes inscrits dont 68 % d’athlètes français, et plus de 50 nationalités représentées (9).

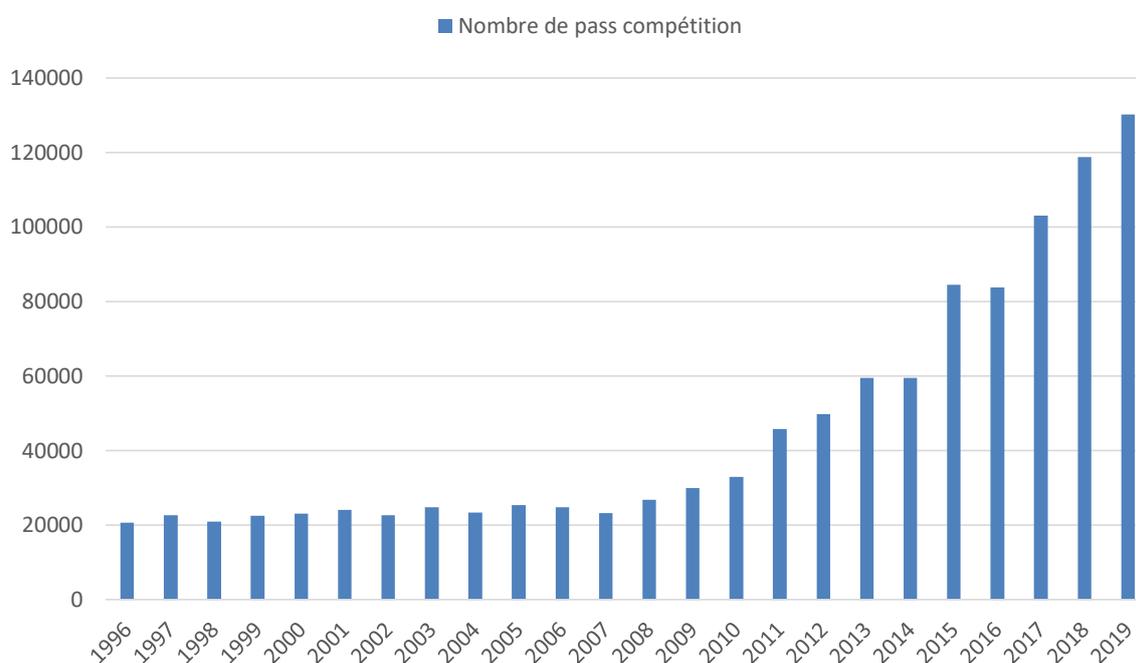
D’autres organisateurs privés choisissent aujourd’hui de se démarquer en mettant sur pied des épreuves hors cahier des charges fédéral pour des raisons qui leur sont propres, ce qui complexifie aussi les relevés. Par conséquent, le nombre d’épreuves labellisées FFTRI ne tient pas compte des dites épreuves (**figure 1-7**).

Figure 1-7. Evolution du nombre d’épreuves labellisées FFTRI entre 1994 et 2019 (source FFTRI)



Ajoutons à cela, que tous ces sportifs qui prennent le départ de ces courses hors-normes ne sont pas forcément licenciés d'une fédération, ce qui rend leur dénombrement précis une nouvelle fois difficile. En effet, certains font le choix de s'entraîner seuls, hors club, et prennent le départ de compétitions en France, certificat médical de non contre-indication à la pratique sportive en compétition à l'appui – d'après l'article L231-2-1 modifié par la loi n°2020-1525 du 7 décembre 2020 art. 101, al. II du Code du Sport. Dans le cadre d'épreuves organisées avec un agrément FFTRI, ces personnes doivent payer en plus un « pass compétition » – comprendre une licence journée – qui sera comptabilisé par la fédération. Ce recensement permet également de constater l'engouement croissant de sportifs non licenciés pour des épreuves faisant partie du giron de la FFTRI (**figure 1-8**).

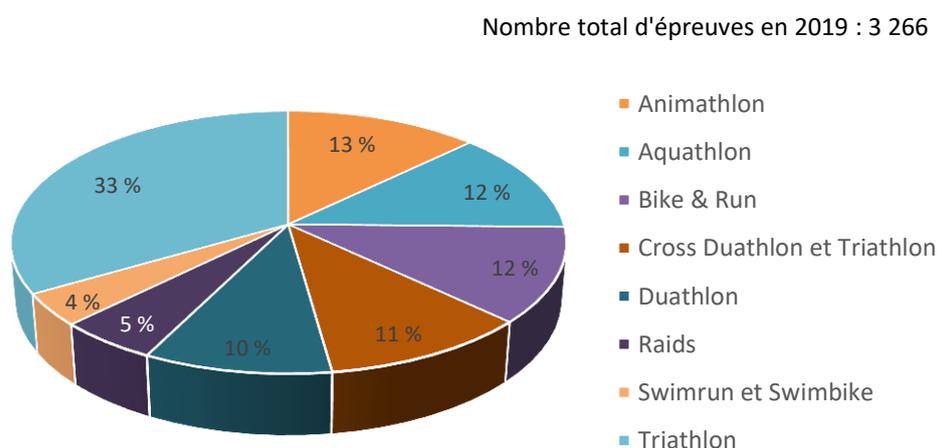
Figure 1-8. Evolution du nombre de pass compétition délivrés entre 1994 et 2019 (source FFTRI)



C'est pourquoi, d'une manière générale, même si les fédérations fournissent, à l'occasion de leurs assemblées générales, un graphique montrant l'augmentation continue du nombre de licenciés par an depuis 10 ans, ce chiffre sous-estime assurément le nombre de compétiteurs engagés sur leurs courses. De plus, il est important de noter que plusieurs fédérations regroupent différents types de pratiques. Par exemple, la Fédération Française d'Athlétisme regroupe les pratiquants de l'athlétisme en salle, qui est bien différent de la pratique de la course à pied sur route ou du trail. Même illustration à la Fédération Française de Natation qui compte entre autres la natation course en

bassin ou en eau libre, la natation synchronisée ou encore le waterpolo ! C'est également le cas pour la Fédération Française d'Équitation qui rassemble les trois disciplines olympiques (saut d'obstacle, dressage, concours complet d'équitation) avec d'autres disciplines un peu moins médiatisées comme la voltige, l'attelage ou encore les *pony-games*. Même combat pour la Fédération Française de Triathlon qui fédère le triathlon olympique, une autre discipline de haut niveau qui est le duathlon, le triathlon longue distance, mais aussi les swimruns et les raids, intégrés à la FFTRI depuis cinq saisons déjà, et représentent désormais 5 % de la totalité des épreuves organisées en 2019 sous le label fédéral (**figure 1-9**).

Figure 1-9. Répartition des épreuves labellisées FFTRI en fonction de leur type pour la saison 2019 (source FFTRI)



Mais quel est l'impact d'une pratique plus intense et plus assidue sur le système cardio-vasculaire, au cours de cette quête du dépassement de soi dans notre société actuelle ? Et à quel prix ? Car les inscriptions à des courses longue distance comme l'Ironman de Nice ne cessent de croître et d'attirer de plus en plus de sportifs, y compris amateurs voire même non pratiquants il y a quelques mois en arrière.

C. Performances sportives et haut niveau

Dans un premier temps, comparons, pour se donner une idée du niveau sportif des plus grands triathlètes internationaux, leurs performances avec celles de leurs homologues spécialistes d'une seule discipline. Ces trois sports pris de façon individuelle sont représentés aux Jeux Olympiques d'Été, mais plutôt sur un format long tandis que le triathlon n'y est présent que sur un format dit « moyenne distance ».

En natation eau libre, seule l'épreuve du 10 km est considérée comme olympique et est également appelée natation marathon. C'est le nageur hollandais F. WEERTMAN qui s'octroie la médaille d'or en 2016 à Rio de Janeiro (BRA) en 1h52'59"800, devant le grec S. GIANNOTIS avec ... exactement le même temps ! Ce qui fait une moyenne de 1 min 8 s au 100 m (10). Chez les femmes, c'est également une hollandaise S. VAN ROUWENDAAL qui monte sur la plus haute marche du podium en 1h56'32"100, soit une moyenne de 1 min 10 s au 100 m (11).

En cyclisme sur route en 2016, l'épreuve de course en ligne de 241,6 km et 785 m de dénivelé positif a été remportée par le belge G. VAN AVERMAET en 6h10'05" soit une moyenne de 39,22 km/h (12). Les femmes, quant à elles, se sont disputées la distance de 130,3 km et 518 m de dénivelé positif, remportée par la hollandaise A. VAN DER BREGGEN en 3h51'27" soit une moyenne de 33,85 km/h (12).

Coté course à pied et plus précisément sur la distance marathon, c'est l'éthiopien E. KIPCHOGE qui remporte l'édition 2016 en 2h08'44" soit une moyenne de 3 min 3 s au kilomètre pour couvrir les 42,195 km (13). Chez les femmes, c'est la kenyane J. SUMGONG qui s'adjuge l'épreuve en 2h24'04" soit une moyenne de 3 min 25 s au kilomètre (14).

Pourquoi détailler toutes ces performances ? Tout simplement pour montrer que les durées de ces efforts sont proches des deux heures au minimum, voire le triple lorsqu'il s'agit de la course en ligne de cyclisme chez les hommes. Le terme d'endurance prend là tout son sens. Ces chiffres ne sont pourtant que la partie émergée de l'iceberg, qui cache des heures d'entraînement pour améliorer sa physiologie à l'effort en repoussant sa fatigue au moins métabolique, et donc sa performance.

Mais qu'en est-il du triathlon ? Le triathlon a la particularité d'être une discipline olympique depuis les Jeux Olympiques de Sidney en 2000 et se dispute sur la distance du même nom – ou format M pour la Fédération Française de Triathlon – soit 1500 m de natation / 40 km de vélo / 10 km de course à pied. En 2016, c'est l'anglais A. BROWNLEE qui remporte sa deuxième médaille d'or consécutive en 1h45'01" (17'24" en natation soit 1 min 10 s au 100 m ; 55'04" en vélo soit une vitesse moyenne de 43,64 km/h ; 31'09" à pied soit 3 min 7 s au kilomètre) en battant son frère cadet J. BROWNLEE de six secondes (15). Chez les femmes, l'américaine G. JORGENSEN s'impose en leader incontestable en 1h56'16" (19'12" en natation soit 1 min 17 s au 100 m ; 1h01'21" en vélo soit 39,34 km/h ; 34'09" à pied soit 3 min 25 s au kilomètre), quarante seconde devant sa rivale et très expérimentée N. SPIRIG, victorieuse en 2012 (16).

Prenons maintenant les résultats des derniers Championnats du Monde Ironman® de 70.3 (distance half-ironman : 1900 m de natation / 90 km de vélo / 21 km de course à pied), qui se sont tenus à Nice au mois de septembre 2019. C'est le norvégien G. IDEN qui remporte le titre en 3h52'35" (23'55" en natation soit 1 min 10 s au 100 m / 2h17'25" en vélo soit 39,42 km/h / 1h08'10" en course à pied soit 3 min 15 s au kilomètre) (9). Chez les femmes, c'est la suisse D. RYF – une habituée des places d'honneur sur ce format de course – qui s'octroie la médaille d'or en 4h23'03" (26'32" en natation soit 1 min 23 s au 100 m / 2h33'38" en vélo soit 35,29 km/h / 1h18'37" à pied soit 3 min 43 s au kilomètre) (9).

Sur le format « full-distance » c'est-à-dire ironman dont les Championnats du Monde se tiennent à Hawaï (USA) chaque année depuis la création de l'épreuve en 1978, c'est l'allemand J. FRODENO qui remporte la couronne de lauriers en 7h51'13" durant l'édition 2019. Non content de s'adjuger cette mythique course pour la troisième fois après les éditions 2015 et 2016, il signe le record de l'épreuve, améliorant de 1 min 17 s la performance de P. LANGE établie une année plus tôt (9). Doublé allemand en 2019 puisque c'est A. HAUG qui l'emporte chez les dames avec un temps de 8h40'10". Le record de l'épreuve est actuellement détenu par D. RYF en 8h26'16" lors de l'édition 2018, qu'elle remportait cette année-là pour la quatrième fois consécutive (9).

L'ensemble de ces vitesses normalisées, au 100 m pour la natation et au kilomètre pour la course à pied, est repris dans le **tableau 1-1**, pour les trois distances reines en triathlon et pour les trois disciplines seules, qui composent le triathlon, en 2016 et 2019.

Tableau 1-1. Vitesses de course lors des différentes épreuves de triathlon mais également de natation, cyclisme et course à pied seules, pour les grandes échéances internationales 2016 et 2019

	Temps total	Natation	Vélo	Course à pied
Triathlon IM				
Hommes	7 h 51 min 13 s	1 min 15 s	42,19 km/h	3 min 51 s
Femmes	8 h 40 min 10 s	1 min 26 s	37,20 km/h	4 min 03 s
Triathlon half-IM				
Hommes	3 h 52 min 25 s	1 min 10 s	39,42 km/h	3 min 15 s
Femmes	4 h 23 min 03 s	1 min 23 s	35,29 km/h	3 min 43 s
Triathlon DO				
Hommes	1 h 45 min 01 s	1 min 10 s	43,64 km/h	3 min 07 s
Femmes	1 h 56 min 16 s	1 min 17 s	39,34 km/h	3 min 25 s
Epreuves simples				
Hommes	-	1 min 08 s	39,22 km/h	3 min 03 s
Femmes	-	1 min 10 s	33,85 km/h	3 min 25 s

Triathlon IM : championnats du monde de triathlon Ironman à Hawaï en 2019

Triathlon half-IM : championnats du monde de triathlon half-Ironman à Nice en 2019

Triathlon DO : triathlon aux Jeux Olympiques de Rio en 2016

Epreuves simples : natation 10 km, cyclisme course en ligne et marathon aux Jeux Olympiques de Rio en 2016

Cependant, pour en arriver à un tel niveau de performance, il faut être en capacité de pouvoir enchaîner des volumes d'entraînement importants et de qualité. Quand on est spécialiste d'une seule discipline sportive, la variabilité des entraînements est moindre, ce qui en limite le volume par rapport à un triathlète, qui doit « jongler » entre les trois sports ... et qui est capable du même niveau de performance (ou presque) que les spécialistes, comme le montre le **tableau 1-1**. L'avantage de cette discipline sportive est qu'elle oblige à pratiquer trois activités complémentaires, ce qui permet de diminuer le risque de blessures lié à une surcharge d'entraînement. De plus, avec le développement de l'entraînement dit polarisé – entraînement pour lequel 80 % du temps est passé en endurance, les 20 % restants étant destinés à la haute intensité qui permettra de développer résistance à la fatigue et vitesse – le risque de blessures est également réduit. Ce risque est d'autant plus diminué lorsqu'on allie un sport porté comme le cyclisme ou la natation, avec un sport en charge comme la course à pied, ce qui se fait de plus en plus y compris pour les coureurs à pied. Gardons toutefois en tête que les triathlètes sont des sportifs qui peuvent totaliser jusqu'à 40 heures

d'entraînement par semaine en période de stage, tandis que les coureurs longue distance sont aux alentours de 20 heures contre 30 heures hebdomadaires pour les cyclistes professionnels. Mais que penser de l'impact de ces pratiques intensives, tant en volume d'entraînement qu'en intensité, sur le système cardio-vasculaire ?

II. Pratique sportive et adaptations cardio-vasculaires : recherches initiales

A. Réflexion sur la classification des sports

Jere H. Mitchell est un médecin américain, membre de l'*American College of Cardiology*. Il était rattaché au département de médecine interne et de physiologie de l'Université du Texas. Ses domaines de recherche sont la physiologie cardio-vasculaire de l'exercice ainsi que le contrôle de la fonction du ventricule gauche. Ce chercheur considérait que chaque exercice physique peut être divisé en deux types, dynamique et statique (17). Un exercice dynamique va générer une force intramusculaire limitée, à la différence de l'exercice statique qui va produire une force importante. Cette différence ne se limite pas à l'aspect musculaire puisque ces deux types d'exercice vont générer des répercussions cardio-vasculaires non similaires, rappelées dans le **tableau 1-2**.

Tableau 1-2. Répercussions cardio-vasculaires d'un exercice dynamique ou statique, d'après Asmussen, 1981 (17)

	Exercice dynamique	Exercice statique
Consommation en oxygène	↗↗↗	↗
Débit cardiaque	↗↗↗	↗
Fréquence cardiaque	↗↗↗	↗
Volume d'éjection systolique	↗↗↗	-
Pression artérielle systolique	↗↗↗	↗↗↗
Pression artérielle diastolique	↘↘	↗↗↗
Pression artérielle moyenne	↗↗	↗↗↗
Résistance totale périphérique	↘↘↘	-
Contrainte générée	Contrainte de volume sur le ventricule gauche	Contrainte de pression sur le système cardio-vasculaire

Du fait de ces observations, Mitchell et al. ont bâti la *Classification of sports* en fonction de l'intensité – faible, modérée, élevée – de chacune des deux composantes, statique et dynamique (18). Ils y incluent également le risque de collision lors des compétitions ou encore le risque de syncope, et mettent cependant en garde sur l'aspect relativement théorique de cette classification (**figure 1-10**).

Figure 1-10. Classification des sports de Mitchell, présentée par Levine et al. dans *Circulation*, en 2005 (19)

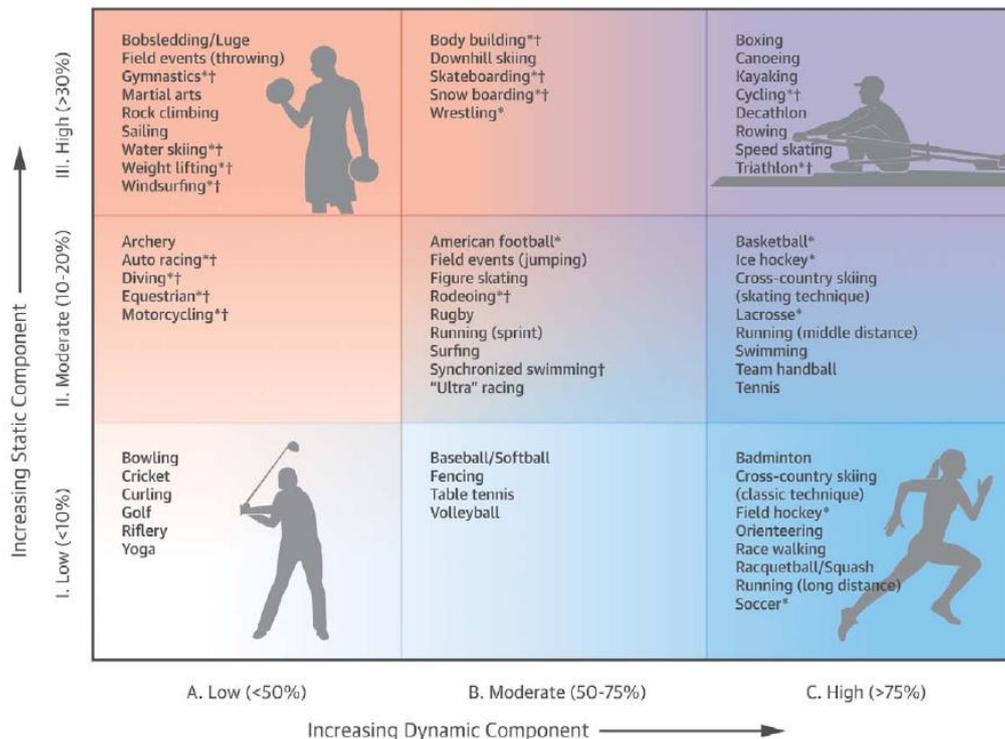


Figure. Classification of sports. This classification is based on peak static and dynamic components achieved during competition; however, higher values may be reached during training. The increasing dynamic component is defined in terms of the estimated percentage of maximal oxygen uptake (Vo_{2max}) achieved and results in an increasing cardiac output. The increasing static component is related to the estimated percentage of maximal voluntary contraction reached and results in an increasing blood pressure load. The lowest total cardiovascular demands (cardiac output and blood pressure) are shown in the palest color, with increasing dynamic load depicted by increasing blue intensity and increasing static load by increasing red intensity. Note the graded transition between categories, which should be individualized on the basis of player position and style of play. *Danger of bodily collision (see Table for more detail on collision risk). †Increased risk if syncope occurs. Modified from Mitchell et al³ with permission. Copyright © 2005, *Journal of the American College of Cardiology*.

Cet outil a d'ailleurs une utilité clinique intéressante. Pour cela, il faut s'en référer à la 36^e Conférence de Bethesda qui s'est tenue en 2004, au cours de laquelle l'*American College of Cardiology Foundation* a formulé des recommandations de pratique sportive pour les athlètes présentant des pathologies cardio-vasculaires (20). Les auteurs font référence au tableau ci-dessus pour autoriser la pratique d'un ou de plusieurs sports en fonction de la pathologie en présence. Un extrait (**figure 1-11**) est présenté ci-dessous.

Figure 1-11. Extrait de la 36^e conférence de Bethesda – chapitre sur les cardiopathies congénitales (Task Force 2), 2005 (20)

<ul style="list-style-type: none"> • Absence of symptoms, as defined in the preceding text. <p>3. Athletes with severe AS should not participate in competitive sports.</p> <p>The criteria in this section also apply to athletes with <i>discrete (membranous) subaortic stenosis</i> and <i>supravalvular aortic stenosis</i>.</p> <p>Aortic stenosis—treated by operation or balloon valvuloplasty. After operation, a variable degree of residual stenosis or regurgitation, or both, can be present. Re-evaluation by physical examination, ECG, and echocardiography is necessary for reassessment. In addition, exercise stress testing or catheterization, or both, can be required for patients whose physiologic and anatomic severity cannot otherwise be determined.</p> <p>Recommendations:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Athletes with residual mild, moderate, or severe stenosis should follow the same recommendations as previously defined for untreated patients. 2. Athletes with moderate to severe aortic regurgitation should follow the recommendations in Task Force 3: Valvular Heart Disease. 3. Because of the propensity for recurrence of LV outflow obstruction in discrete subaortic stenosis postoperatively, these patients require continued follow-up and re-evaluation annually for exercise recommendations. This recommendation also applies to all other forms of fixed AS. <p>Coarctation of the aorta—untreated. This abnormality is characterized by obstruction usually present in the juxtaductal or juxtaligamentary area. Severity is assessed by the arm and leg pressure gradient, physical examination, exercise</p>	<p>Coarctation of the aorta—treated by surgery or balloon angioplasty. The majority of patients will have coarctation repair or balloon arterioplasty performed during childhood. After repair, abnormalities can persist, such as a mild residual gradient, ventricular hypertrophy, systemic hypertension, and residual obstruction evident on exercise (9,10). Before a decision for participation, minimal diagnostic studies, including a chest radiograph, ECG, exercise testing, and echocardiographic evaluation of LV function and aortic anatomy, should be done. Magnetic resonance imaging can be useful to document residual anatomical abnormalities, aortic dilation, or aneurysm formation.</p> <p>Recommendations:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Participation in sports, three or more months after surgical or balloon angioplasty for coarctation of the aorta, is permitted for athletes with a 20 mm Hg or less arm/leg blood pressure gradient at rest and a normal peak systolic blood pressure during rest and exercise. 2. During the first postoperative year, athletes should refrain from high-intensity static exercise (classes IIIA, IIIB, and IIIC) and sports that pose the danger of bodily collision. 3. After three months, if patients continue to be asymptomatic, with normal blood pressure at rest and exercise, all sports are permissible except those with a large static component (particularly, classes IIIA, IIIB, and IIIC). 4. For athletes with evidence of significant aortic dilation, wall thinning, or aneurysm formation, participation should be restricted to low-intensity competitive sports (classes IA and IB).
---	--

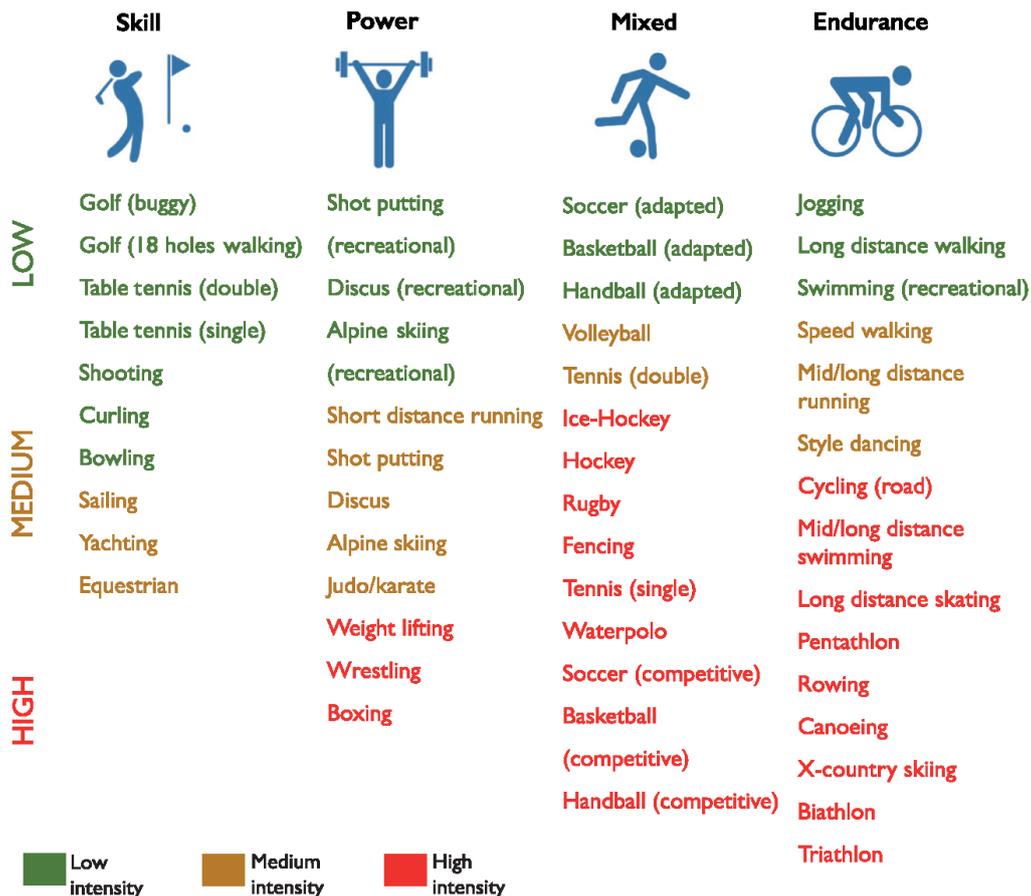
AS : aortic stenosis ; ECG : électrocardiogramme ; LV : left ventricule

Ce document est très pratique et utile pour tout cardiologue ou médecin du sport, qui se doit de se positionner lors de la rédaction du certificat médical de non contre-indication à la pratique du sport, et notamment en compétition (21). Toutefois en 2020, la *Task Force on sports cardiology and exercise* de l'*European Society of Cardiology* (ESC) a émis des recommandations quant à la pratique sportive des patients présentant des pathologies cardio-vasculaires (22).

En même temps, cette *Task Force* propose une nouvelle classification des sports (22), en partant du postulat suivant : « Une classification précise des sports en utilisant les différentes composantes de FITT (*Frequency, Intensity, Time, and Type*) est difficile en raison des spécificités liées au type de travail musculaire, de mode, de volume et d'intensité de l'exercice. De plus, la plupart des sports sont constitués d'une composante musculaire isotonique et isométrique. Par exemple, les activités de résistance peuvent être effectuées de manière principalement dynamique ou principalement statique. Certains sports exigent une composante motrice et un niveau d'habileté élevés. D'autres sont pratiqués à une intensité faible, modérée, élevée ou très élevée. Ces intensités peuvent varier en fonction du type de sport ou du niveau professionnel, amateur ou récréatif de la pratique sportive. »

Désormais, la *Task Force* classe les différents sports selon les termes de « *skill* (habileté) / *power* (puissance) / *mixed* (mixte) / *endurance* (endurance) », mais fait également la différence entre les niveaux d'intensité des sports pratiqués des-dites catégories (**figure 1-12**).

Figure 1-12. Nouvelle classification des sports selon la *Task Force on sports cardiology and exercise* de l'*European Society of Cardiology*, 2021 (22)



B. Premiers éléments de recherche

Cette première classification des sports de 1994 est probablement le fruit de nombreuses réflexions de Mitchell quant à la physiologie cardio-vasculaire à l'effort. En effet, dans les années 1970, il s'est intéressé à l'impact de l'exercice sur les adaptations cardio-vasculaires. En 1974, il publie avec Wyatt dans *Circulation Research* un travail sur l'impact de l'entraînement physique sur le cœur de chiens (23). Les auteurs constatent qu'un entraînement quotidien pendant trois mois permet notamment de diminuer la fréquence cardiaque de repos par rapport à un groupe de chiens contrôle. Ils observent également une augmentation de l'épaisseur de la paroi du ventricule gauche (VG) en fin de diastole ainsi qu'une augmentation de la masse de ce même ventricule. En trois mois d'entraînement physique régulier et suffisant chez ces mammifères, il semble donc exister des adaptations fonctionnelles du cœur. Mitchell ouvre alors la voie à l'existence d'adaptations cardiaques liées à l'entraînement sportif.

Quelques années plus tard en 1980, Mitchell s'intéresse avec ses collaborateurs à la mesure en échographie de la masse du ventricule gauche dans plusieurs populations de sportifs humains cette fois-ci, à savoir des haltérophiles amateurs et professionnels, ainsi que des compétiteurs de course à pied longue distance (24). Ils constatent que la masse absolue du VG augmente significativement dans les deux groupes d'athlètes. Si cette masse est indexée sur la masse maigre, alors seul le groupe course à pied montre une augmentation significative. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'un coureur à pied va peu modifier sa composition corporelle avec l'entraînement, contrairement aux haltérophiles qui augmentent aussi leur masse maigre, ce qui nivelle l'impact de l'entraînement sur la prise de masse du VG.

Dans une seconde étude parue une année plus tard en 1981 pour laquelle Mitchell apparaît en dernier auteur, Longhurst et al. s'intéressent aux adaptations cardio-vasculaires générées par l'entraînement chronique, et ce en fonction des composantes statique et dynamique de l'exercice (25). Pour cela, ils étudient de façon contrôlée un groupe de coureurs longue distance et un groupe d'haltérophiles compétiteurs. Les résultats observés sont relativement superposables à ceux exposés dans l'étude précédente. En effet, les auteurs observent une augmentation de la masse du VG, qu'elle soit absolue ou indexée sur la masse maigre, ainsi qu'une bradycardie relative, conservée lors du test d'exercice statique par *handgrip* (**figure 1-13**). Au cours de ce même test, ils constatent également une augmentation des volumes télésystolique et télédiastolique du ventricule gauche,

tandis que le volume d'éjection indexé et l'index cardiaque restent stables par rapport au groupe contrôle.

Du côté des haltérophiles, l'ensemble des paramètres étudiés – masse indexée du VG, fréquence cardiaque et paramètres cardiaques évalués en échographie lors de l'exercice statique – reste inchangé par rapport au groupe contrôle. Seule la valeur absolue de la masse du VG est augmentée. Par conséquent, on peut affirmer que l'entraînement en endurance modifie les valeurs absolue et relative de la masse du VG ainsi que la réponse cardio-vasculaire liée à l'exercice statique. D'un autre côté, l'entraînement statique comme c'est le cas lors de la pratique de l'haltérophilie, augmente la valeur absolue de la masse du VG mais pas sa masse indexée sur la masse maigre. Cependant, la réponse hémodynamique immédiate lors de la pratique de ce type d'exercice statique semble similaire chez les personnes entraînées et chez les personnes contrôle, non entraînées.

Figure 1-13. Photo d'un handgrip



Avec les travaux de Mitchell, on constate qu'une pratique sportive suffisante va générer certaines adaptations cardio-vasculaires fonctionnelles modestes. Mais aussi qu'elle va provoquer des modifications structurelles cardiaques qui semblent différentes en fonction du sport pratiqué, ce qui va intéresser de nombreux auteurs.

C. Mise en évidence des adaptations cardiaques structurelles liées à l'exercice : le cœur d'athlète

Un autre auteur s'est intéressé dans les années 1970 aux adaptations cardiovasculaires générées par l'exercice. En 1974, Morganroth et al. se penchent sur l'hypertrophie idiopathique du ventricule gauche chez des adultes puis en 1975 chez des enfants en bonne santé, pour lesquels il va conduire une étude sur les preuves échocardiographiques de ce diagnostic.

Toujours en 1975, Morganroth et al. publient donc un premier travail sur les dimensions du ventricule gauche dans cette population particulière qu'est celle de sportifs (26). Ils comparent, par rapport à une population contrôle, des athlètes universitaires pratiquant depuis plus de trois ans à raison d'au moins 200 jours par an, soit un sport qu'on qualifiera d'isotonique, soit un sport isométrique. Dans le groupe isotonique – exercice pour lequel le muscle se contracte en gardant une force constante mais dont la longueur varie, on retrouve des athlètes pratiquant la natation et la course à pied longue distance. Ces derniers présentent une augmentation du volume télédiastolique du VG ainsi que de sa masse. Cependant, l'épaisseur de sa paroi n'est pas modifiée. De l'autre côté, dans le groupe isométrique – exercice pour lequel la longueur du muscle ne varie pas – qui comprend des athlètes pratiquant la lutte et le lancer de poids, on observe une augmentation de la masse du VG et de l'épaisseur de sa paroi, sans qu'il y ait de modification du volume télédiastolique. Ils en concluent donc que les athlètes du groupe isotonique présentent des adaptations cardiaques similaires à celles qui sont observées en cas de surcharge volumique chronique, tandis que les athlètes du groupe isométrique présentent des modifications cardiaques en lien avec des surcharges chroniques en termes de pression.

Morganroth pose dans cet article les bases de ce qu'on appellera quelques années plus tard les remodelages cardiaques respectivement excentrique et concentrique. La différence entre les deux types résulte dans l'analyse du rapport entre l'épaisseur de la paroi du VG et le rayon de la cavité ventriculaire (lumière et paroi comprises), également appelé Epaisseur de Paroi Relative (EPR) (27). En cas de remodelage excentrique, l'EPR est bas ce qui se traduit par une masse VG normale associée à la dilatation de ce ventricule gauche ; tandis qu'en cas de remodelage concentrique, l'EPR est élevée ce qui correspond à une masse et une taille normales du VG, mais plus précisément à une diminution du volume interne de ce dernier (**figure 1-14**).

Morganroth rappelle qu'il est également important de connaître le profil d'un athlète bien entraîné pour pouvoir interpréter correctement des valeurs échocardiographiques qui s'écarteraient des limites de la normale.

Deux ans plus tard soit en 1977, il profite de son étude échographique pour publier avec Maron un article intitulé *The Athlete's Heart Syndrome : A New Perspective*, qu'ils présentent comme un travail permettant de mettre l'accent sur les informations récemment fournies par les études échocardiographiques sur ce concept assez nouveau de « cœur d'athlète ». Cependant, d'autres auteurs 20 ans avant eux s'étaient intéressés aux adaptations cardio-vasculaires liées à la pratique régulière du sport et évoquaient déjà le concept de *athletic heart*.

On peut citer par exemple l'article de Koeplin paru en 1950 (28) ou celui de Elias Nader paru en 1951 (29), ou encore le travail de Dietlen paru en quatre parties en 1951 (30). Malheureusement, les abstracts de ces études sont pour la plupart indisponibles et celui de Morganroth fait office de première référence consultable à l'heure actuelle. Ça sera d'ailleurs l'un de ses seuls travaux portant sur les sportifs avec ce dernier article paru en 1978, *Cardiac Hypertrophy in Response to Dynamic Conditioning in Female Athletes* (31). Dans cette étude, les auteurs suggèrent que l'aptitude à la performance sportive mesurée par la VO_2 max peut être liée à la capacité du cœur à augmenter la dimension interne du ventricule gauche en fin de diastole (LVIDD).

Ces travaux montrent donc que la pratique régulière et suffisamment ancienne dans le temps d'un sport, permet de générer des adaptations cardiaques qui seront fonction du type de sport pratiqué. Ainsi, le concept de cœur d'athlète apparaît dans la littérature dans les années 1970 et va être très largement étudié au cours des dizaines d'années qui vont suivre.

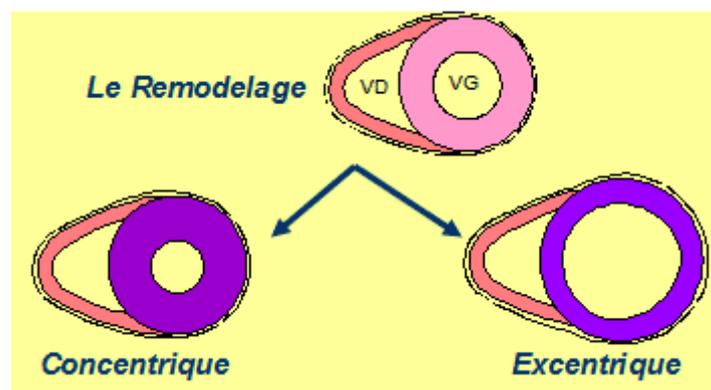
III. Remodelage cardiaque et sport

A. Dénombrement

1. Fondements du remodelage cardiaque chez le sportif

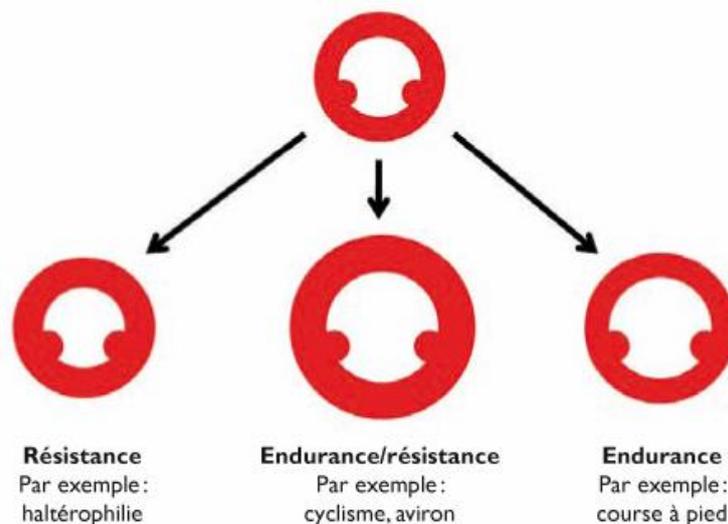
Le remodelage est un terme générique désignant l'ensemble des modifications structurales – aux niveaux anatomique, histologique et biologique – d'un tissu ou d'un organe survenant au cours du temps. Morganroth et al. évoquent donc l'existence de deux types de remodelage en fonction du sport pratiqué, qu'il soit isométrique ou isotonique (32). Mitchell et al. parleront finalement quelques années plus tard, de remodelages – sous-entendu cardiaque – excentrique et concentrique (18). Chez le sportif, l'hypertrophie cardiaque est dite excentrique lorsqu'on observe une augmentation en valeur absolue de la masse du ventricule – le plus souvent gauche – ainsi que de ses dimensions internes. Cette présentation est notamment retrouvée chez des athlètes qui pratiquent des sports avec une composante dynamique élevée comme le badminton ou encore la course à pied longue distance. D'un autre côté, l'hypertrophie cardiaque est dite concentrique lorsqu'on observe une majoration de la masse du ventricule gauche sans augmentation associée de ses dimensions internes. C'est le cas par exemple des sportifs qui pratiquent une activité à composante statique élevée comme l'escalade ou l'haltérophilie. La **figure 1-14** ci-dessous illustre ces propos.

Figure 1-14. Schématisation des remodelages cardiaques concentrique et excentrique (source <https://pathologie-cardio-vasculaire.edu.umontpellier.fr/>)



Cependant, les athlètes qui pratiquent des sports qui associent des composantes statique et dynamique élevées comme les cyclistes ou les rameurs posent un problème. D'après les travaux de Pelliccia et al. parus en 1991 (33) et de Mitchell et al. parus en 1994 (18), ces athlètes présenteraient donc une combinaison d'hypertrophies cardiaques excentrique et concentrique, qu'on pourrait qualifier de remodelage mixte, comme schématisé par la **figure 1-15** ci-dessous. Par conséquent, ces sportifs ne rentreraient plus dans le cadre très « binaire » fixé par Morganroth, ce qui interroge.

Figure 1-15. Illustration des différents types de remodelage cardiaque en fonction du sport pratiqué, d'après Netgen, 2012 (34)



2. Notion de remodelage mixte

Cette notion de remodelage mixte a cependant été confirmée par les travaux de Spirito et al. pour lesquels a collaboré Pelliccia, dans cet article publié en 1994 dans *The American Journal of Cardiology* (35). Les auteurs utilisent l'échocardiographie pour étudier les adaptations cardiaques morphologiques chez 947 athlètes élités évoluant au niveau national ou international, et qui représentaient 27 sports. Parmi les différents résultats, on note que les cyclistes d'endurance, les rameurs et les nageurs ont les plus importants volumes diastoliques gauches et les plus importants épaissements pariétaux. Les haltérophiles et les lutteurs présentent quant à eux des valeurs élevées de l'épaisseur de leur paroi ventriculaire et ce, de façon relative aux dimensions de leurs

cavités cardiaques. Cependant, la valeur absolue de leur paroi ventriculaire reste dans les limites de la normale. Les auteurs concluent en disant que les dimensions du ventricule gauche sont impactées différemment en fonction du sport pratiqué, mais également que le sexe a une influence sur la morphologie du cœur d'athlète, indépendamment du type de sport, de l'âge et de la surface corporelle.

Cet article de Spirito et al. est d'ailleurs repris par Pluim et al. dans sa méta-analyse sur le cœur d'athlète publiée dans *Circulation* en 2000, qui rassemble 59 études soit un peu plus de 1400 athlètes de moins de 40 ans – coureurs à pied longue distance, cyclistes, rameurs, haltérophiles, culturistes, lutteurs ou encore lanceurs (36). Les auteurs ont donc étudié les similitudes et les différences qui existent au niveau cardiaque, tant sur le plan morphologique que fonctionnel, et ce en fonction des différents sports. Il en résulte la conclusion suivante : il existe bien des arguments en faveur d'un remodelage spécifique aux sports d'endurance mais également aux sports de force. Cependant, il existe aussi des adaptations cardiaques « borderline » pour les athlètes pratiquant des sports aux composantes dynamique et statique aussi marquée l'une que l'autre, comme pour les triathlètes qui font partie de la catégorie III C de la classification des sports de Mitchell (18).

C'est pourquoi cette classification en tant que « cœur entraîné en endurance » dit remodelage excentrique, ou « cœur entraîné en force » dit remodelage concentrique, n'est pas un concept absolu et dichotomique mais plutôt un concept relatif. Cette mise en garde était déjà évoquée par Mitchell (18). Par-delà, l'hypothèse ancestrale de Morganroth se retrouve à nouveau quelque peu bousculée.

Ce n'est qu'à la fin des années 2000 que quelques rares articles sont publiés sur cette remise en cause. Le premier est celui de Naylor et al. en 2008. Il est rappelé que, d'après Morganroth et al., les adaptations cardiaques observées chez les athlètes résultent des contraintes hémodynamiques imposées aux ventricules à force de séances d'entraînement répétées. Il a d'ailleurs été largement adopté dans la littérature scientifique et médicale, que les athlètes d'endurance ont des cavités cardiaques plus grandes que les sujets contrôles ou que les athlètes de force, entraînés en résistance. Cependant, certaines études suggèrent que l'épaisseur de la paroi du ventricule gauche est plus importante chez les athlètes d'endurance que chez les athlètes de force, tandis que d'autres n'ont pas démontré de changements morphologiques chez les athlètes entraînés en résistance. De tels désaccords peuvent illustrer la variabilité de l'impact de l'entraînement sur ces adaptations cardiovasculaires, ce que nous avons essayé de prendre en considération dans nos travaux.

Un autre article vient compléter cette remise en question. Il s'agit d'un travail de Haykowsky et al. paru en 2018, auquel a contribué La Gerche (37). Dans cette revue de la littérature, les auteurs abordent les différents fondements de l'hypothèse de Morganroth et leur remise en cause par le biais d'études plus récentes. Outre les aspects liés à l'entraînement en résistance, l'équipe s'intéresse aux effets aigus du stress hémodynamique sur la paroi ventriculaire, généré par un effort en endurance. Morganroth et al. suggéraient que l'exercice en endurance était en premier lieu un stress lié à la charge volumique. Grâce aux travaux de La Gerche et al. en 2011, il est désormais possible de dire qu'un effort en endurance associe un stress lié à la charge volumique à une contrainte de pression. De plus, l'amplitude de l'augmentation de la contrainte pariétale du ventricule droit en fin de systole semble dépendre de l'intensité de l'exercice (38).

Dans une seconde partie, Haykowsky et al. s'intéressent à l'évolution du remodelage ventriculaire généré par un entraînement en endurance au cours du temps. Deux études, celle de Arbab-Zadeh et al. (39) et celle de Weiner et al. (40), s'accordent à dire, malgré leurs disparités dans le protocole appliqué, que l'entraînement en endurance est associé à un modèle de remodelage du ventricule gauche en deux phases, modèle qui semble être fonction du passif sportif l'individu, mais également du mode d'entraînement appliqué (37). Précisons qu'un exercice à intensité sous-maximale est associé à une plus grande contrainte de pression, tandis qu'un exercice à haute intensité va générer un régime de pressions continues associé à une contrainte volumique plus élevée (41).

Enfin, dans une troisième partie, Haykowsky et al. comparent la contrainte pariétale ventriculaire entre des athlètes et des patients porteurs d'une pathologie cardiaque, ou comment étudier l'impact d'une contrainte hémodynamique intermittente versus permanente. Effectivement, l'hypothèse de Morganroth ne prend pas en considération le fait que la charge hémodynamique imposée par un exercice est un phénomène intermittent. Étant donné que le stimulus hémodynamique qui va induire ce remodelage vasculaire n'est présent que durant l'exercice, l'ampleur du remodelage est probablement influencée par le temps passé à s'entraîner. Ceci peut donc probablement expliquer pourquoi les athlètes qui passent le plus de temps à s'entraîner, comme les cyclistes, les skieurs de cross-country ou encore les triathlètes, tendent à présenter un remodelage cardiaque exercice-induit le plus marqué (33).

Pour conclure, les auteurs suggèrent la nécessité d'avoir recours à de futures études pour quantifier les effets aigus et chroniques du sport sur la contrainte pariétale des ventricules gauche et droit, ainsi que ses déterminants comme la pression transmurale ou encore la géométrie ventriculaire (37).

Ce remodelage cardiaque pose donc beaucoup d'interrogations, que ce soit dans le monde sportif ou dans le domaine de la pathologie cardio-vasculaire. Cependant, une des principales questions des cliniciens et des chercheurs en cardiologie du sport est la suivante : jusque dans quelles mesures peut-on considérer comme physiologiquement acceptable, le remodelage cardiaque induit par la pratique sportive ?

B. Cœur d'athlète ou cardiomyopathie hypertrophique : quelles limites ?

Lorsqu'on se trouve devant un athlète qui présente une hypertrophie cardiaque, se pose alors la question de savoir si cette hypertrophie est physiologique ou si elle correspond à une cardiomyopathie hypertrophique, potentiellement létale si rien n'est fait en amont. Plusieurs auteurs se sont donc penchés sur cette question, et notamment sur celle de la *grey zone* – la zone borderline en échocardiographie transthoracique, qui se trouve entre des mesures qui relèvent de la physiologie et celles qui relèvent de la pathologie. Pourquoi est-ce donc si important de faire précocément le diagnostic de cardiomyopathie hypertrophique non obstructive (CMHNO) ?

Tout simplement parce que c'est une des causes les plus fréquentes de mort subite chez les jeunes sportifs. Le problème est que la symptomatologie clinique chez ces patients peut être très discrète et que les modifications électriques constatées sur l'électrocardiogramme des athlètes d'endurance peuvent être similaires à celles des patients atteints de CMHNO. Dickhuth et al. ont donc réalisé en 1994 une étude échocardiographique comparant les différents paramètres mesurés entre deux populations de volontaires avec une CMHNO – une qui ne pratique pas de sport, et l'autre qui pratique un sport d'endurance entre 3 et 5 heures par semaine – et une population de sujets sains présentant une hypertrophie cardiaque physiologique en lien avec une pratique régulière d'activités sportives d'endurance (42). Les auteurs montrent notamment que l'épaisseur de la paroi du septum et de la paroi postérieure du VG ne diffère pas dans les deux groupes de CMHNO mais que cette épaisseur est significativement différente pour les athlètes en bonne santé, autrement dit

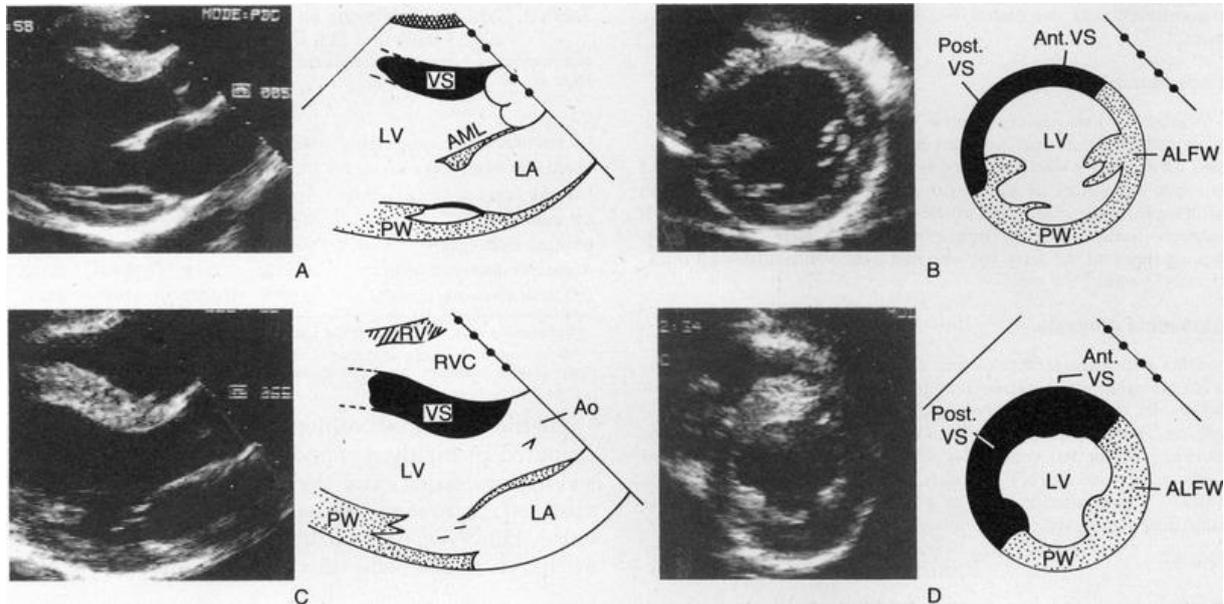
ces parois sont plus fines. L'échocardiographie apparaît donc comme une méthode non invasive précieuse pour différencier la CMHNO du cœur d'athlète, y compris pour les patients atteints de CMHNO et pratiquant des sports d'endurance.

Cette étude peut d'ailleurs être complétée par les travaux de Lauschke et Maisch publiés en 2009, dans lesquels ces derniers précisent les différences manifestes qui existent en échocardiographie entre des athlètes présentant une hypertrophie compatible avec un cœur d'athlète, et des athlètes atteints d'une cardiomyopathie hypertrophique (CMH) (43). Ils précisent notamment qu'en cas de CMH, la fonction diastolique, c'est-à-dire la capacité de relaxation du ventricule, est altérée chez la majorité des patients. De plus, en cas de diagnostic incertain, il est recommandé d'avoir recours en deuxième intention à une IRM cardiaque avant d'entreprendre par la suite des explorations histologiques et génétiques complémentaires.

Cependant, dès 1991, Pelliccia et al. précisaient les modalités d'évaluation (**figure 1-16**), notamment les valeurs de cette *grey zone* – soit pour une épaisseur du ventricule gauche comprise entre 13 et 15 mm – en y incluant également l'utilité des périodes de repos complet (33). En effet, ces périodes « off » d'au moins six mois vont générer un déconditionnement du muscle cardiaque. En cas de cœur d'athlète, le cœur va « s'amyotrophier » – on parlera alors de remodelage inverse. Mais, en cas de CMH vraie, il restera hypertrophié.

A noter cependant, dans une étude bien plus récente parue en 2019, que Czimbalmos et al. élargissent quelque peu cette zone grise de 15 à 16 mm pour sa limite supérieure (44).

Figure 1-16. Images échocardiographiques bidimensionnelles à cadre fixe obtenues lors de la diastole, et dessins schématiques correspondants d'un cycliste de 21 ans avec une paroi ventriculaire gauche normalement épaisse (A,B), et d'un canoéiste de 25 ans avec un épaissement de la paroi ventriculaire gauche (C,D), d'après Pelliccia et al., 1991 (33)



ALFW : paroi libre antérolatérale ; AML : feuillet mitral antérieur ; Ant. VS : septum ventriculaire antérieur ; Ao : aorte ; LA : oreillette gauche ; LV : ventricule gauche ; Post. VS : septum postérieur ; PW : paroi postérieure du ventricule gauche ; RV : ventricule droit ; RVC : cavité ventriculaire droite ; VS : paroi ventriculaire antérieure.

Chez le cycliste, la vue parasternale grand axe (A) montre une épaisseur normale de la paroi ventriculaire antérieure et de la paroi postérieure (11 mm et 10 mm), mais une cavité ventriculaire gauche élargie en fin de diastole (61 mm).

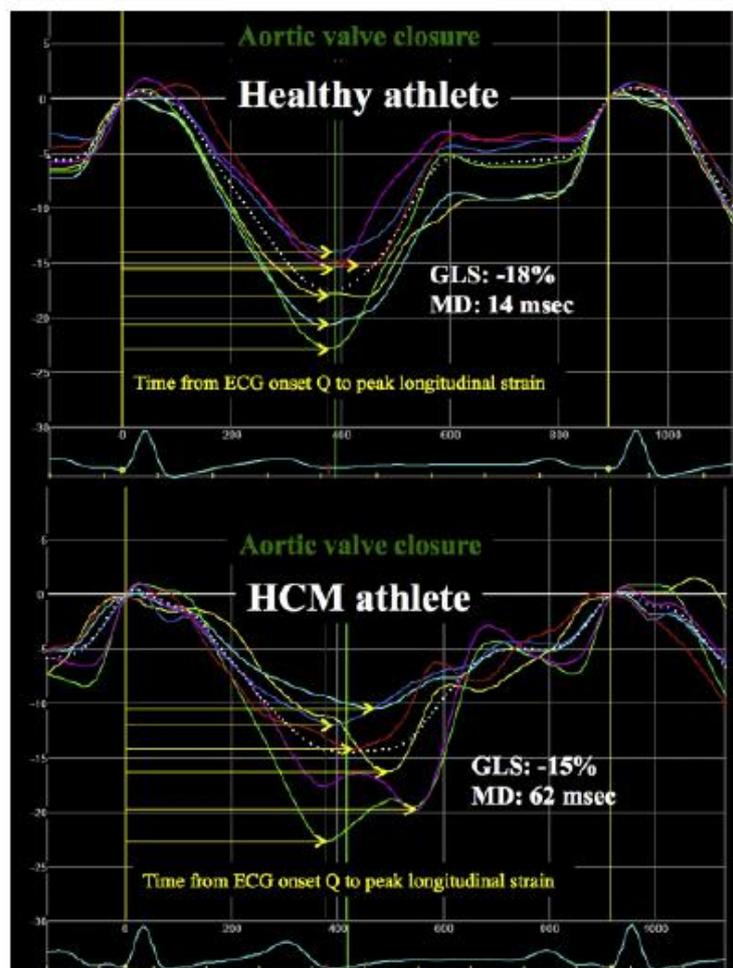
La vue petit axe (B) au niveau du muscle papillaire montre une épaisseur normale de tous les segments de la paroi du ventricule gauche.

Chez le canoéiste, la vue grand axe (C) montre une paroi ventriculaire antérieure épaissie (16 mm), dépassant l'épaisseur de la paroi postérieure du ventricule gauche, et un élargissement modéré de la cavité ventriculaire gauche.

La vue petit axe (D) au niveau du muscle papillaire chez le même athlète montre un épaissement localisé du septum antérieur, alors que la paroi libre et le septum postérieur (Post. VS) sont pratiquement normaux.

Enfin, en 2017, Schnell et al. démontrent l'utilité de l'utilisation du *Global Longitudinal Strain* (GLS) en échocardiographie pour distinguer CMH et cœur d'athlète (45). Le *strain* est une technique relativement récente qui permet d'analyser la déformation du cœur. Dans cet article, l'étude de la *mechanical dispersion* montre une contraction hétérogène du myocarde. Les auteurs en concluent que la *mechanical dispersion* est davantage élevée dans les deux groupes CMH par rapport aux deux groupes contrôle (**figure 1-17**), que ce soit au repos ou au cours de l'effort.

Figure 1-17. Exemple de deux courbes de *strain* en deux dimensions chez un athlète sain (courbe du dessus) et chez un athlète atteint de cardiomyopathie hypertrophique (courbe du dessous), d'après Schnell et al., 2017 (45)



La flèche jaune représente le temps entre l'onde Q détectée par l'échocardiographie et le pic du strain longitudinal. La MD – *mechanical dispersion* – correspond à l'écart-type moyen des mesures réalisées pour les 18 segments (pour davantage de clarté, seuls six d'entre elles sont présentées sur ce graphique).

Toutefois, une autre technique d'imagerie permet de faire cette distinction entre CMH et cœur d'athlète, et s'est considérablement développée ces quinze dernières années : c'est l'imagerie par Résonance Magnétique Cardio-vasculaire ou CMR. L'équipe de Luijckx et al. s'est penchée sur le sujet et a établi un modèle utilisant le ratio entre la mesure du volume télédiastolique du ventricule gauche et la mesure de sa masse en fin de diastole, mesurées en IRM cardiaque (46). Ce ratio apparaît plus élevé chez les patients porteurs d'une CMH que chez les sujets sains, qu'ils soient athlètes ou non. D'ailleurs, les experts de l'*European Association of Cardiovascular Imaging* (EACVI) ont émis des recommandations la même année soit en 2015, quant à l'utilisation multimodale de l'imagerie cardiaque pour caractériser le cœur d'athlète, notamment en cas de doute avec le diagnostic de CMH (47).

L'utilité de la CMR ne s'arrête pas là puisqu'elle peut également contribuer au diagnostic de diverses cardiomyopathies chez le sportif, en plus de la CMH, comme la dysplasie arythmogène du ventricule droit ou la non-compaction du ventricule gauche (48).

C. Sport intensif et cardiopathies secondaires : quand le remodelage cardiaque va trop loin

De nombreux auteurs ont décrit la survenue de cardiopathies arythmogènes et même de cardiopathies dilatées dans les populations de sportifs d'endurance après plusieurs années de pratique à haut volume d'entraînement. De plus, certaines équipes ont montré l'existence de plages de fibrose myocardique chez ces mêmes athlètes, au même titre qu'une cicatrice issue d'une ancienne plaie.

1. Cardiopathies arythmogènes

Dans ce premier groupe de pathologies arythmogènes induites par l'exercice, on note deux entités bien distinctes, à savoir la Dysplasie Arythmogène du Ventricule Droit (DAVD) et la Fibrillation Atriale (FA), qui est la plus répandue.

Ce n'est qu'en 2012 que Heidbüchel et La Gerche évoquent l'impact délétère de la pratique intensive des sports d'endurance sur le ventricule droit, tant de façon aiguë avec l'élévation immédiate du peptide natriurétique de type B (BNP) après une course, que de façon chronique conduisant à une potentielle DAVD exercice induite (49). Ce remodelage pourrait s'expliquer par la contrainte pariétale excessive qui s'exerce sur la paroi du ventricule droit (VD) durant l'effort, entraînant sa dilatation et sa dysfonction. En 2015, La Gerche et al. viennent renforcer cette hypothèse avec une nouvelle étude (50), dans laquelle ils montrent grâce à l'utilisation de la CMR à l'effort, que des athlètes d'endurance, qui ont une fonction cardiaque normale au repos mais qui sont connus pour des arythmies émanant du ventricule droit, présentent une altération de la contractilité du-dit ventricule. Les auteurs avancent même la possibilité d'utiliser le ratio pression-surface mesuré de manière non invasive (échographie) dans le VD en fin de diastole, comme un outil de stratification du risque chez ces athlètes. Enfin, Gülan et al. avancent de possibles explications à la survenue de la DAVD via une modélisation *in vitro* sur un cœur droit en silicone (51). En effet, ils suggèrent que l'exercice, en plus du remodelage anatomique et fonctionnel du ventricule droit, peut modifier le *Wall Shear Stress* (WSS). Le WSS correspond à la contrainte de cisaillement qui s'exerce sur la paroi ventriculaire et se caractérise en termes d'amplitude mais également en termes de distribution spatiale. Il illustre donc les contraintes hémodynamiques qui s'exercent au sein du VD.

Ajoutons que cette notion de distribution spatiale semble être corrélée aux sites communément identifiés de DAVD chez les patients mais aussi chez les athlètes.

Concernant le risque de développer une fibrillation atriale quand on est un athlète d'endurance, l'une des premières revues de la littérature sur le sujet est parue en 2012. A ce moment-là, Calvo et al. souhaitent définir la prévalence de la fibrillation atriale (FA) et du flutter auriculaire dans les populations de sportifs d'endurance (52) alors qu'elle est estimée entre 5,3 et 12,8 % en fonction des études. Les arguments avancés pour expliquer la survenue davantage marquée dans cette population de ces deux types d'arythmie d'origine atriale sont le maintien d'un état inflammatoire chronique notamment chez les sportifs présentant des volumes importants d'activité à haute intensité, ainsi que des perturbations électrolytiques. D'autres arguments sont avancés comme la survenue d'extrasystoles auriculaires ou l'influence du système nerveux autonome avec une majoration de l'activité parasympathique chez les athlètes hautement entraînés. Enfin, le remodelage atrial avec une dilatation de l'oreillette gauche associée à une hypertrophie-dilatation du ventricule gauche, semble être un argument majeur, au même titre que la survenue de séquelles myocardiques (fibrose) dans les suites d'une pratique intense et prolongée chez certains individus.

Ces mêmes mécanismes physiopathologiques envisagés dans la survenue de FA chez les athlètes d'endurance sont également avancés par Estes et al. dans leurs travaux parus en 2017 (53). Les auteurs font également mention des recherches de Mohanty et al. qui présentent une courbe en J du risque de survenue d'une FA en fonction du niveau d'activité physique, c'est-à-dire de sédentaire à intense, et du sexe des individus (**figure 1-18**) (54).

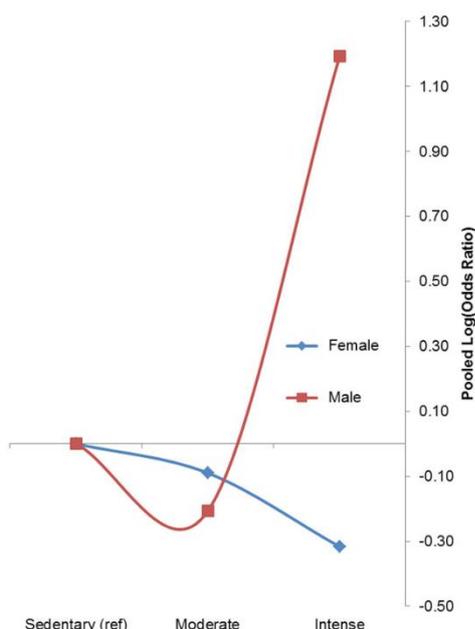


Figure 1-18. Association entre le niveau d'activité physique et le risque de fibrillation atriale chez les hommes et chez les femmes, d'après Mohanty et al., 2016 (54)

Il est également intéressant de remarquer que cette courbe en J ne s'applique qu'à la population masculine.

Pour continuer, Hubert et al. se sont penchés sur la survenue d'une fibrillation atriale paroxystique chez des athlètes d'endurance de plus de 35 ans, qui serait un facteur de risque de FA au long cours (55). Grâce à une analyse échographique utilisant l'étude du *strain* en deux dimensions, les auteurs démontrent l'importance d'une altération de la fonction atriale. En effet, le pic de *strain* atrial longitudinal de l'oreille gauche mais également de l'oreillette droite était diminué dans le groupe d'athlètes vétérans. Ce paramètre fonctionnel semble statistiquement davantage discriminant que la survenue d'un remodelage biatrial à type de dilatation, dans l'apparition d'une FA au long cours.

Enfin, dans cette dernière étude de Elliott et al. publiée en 2018, les auteurs affirment que, chez des athlètes d'endurance amateurs, le risque de dilatation de l'oreillette gauche en l'absence d'une augmentation des paramètres vagaux ou d'ectopie atriale, est proportionnelle au temps passé à s'entraîner au cours d'une vie : 0 % de risque si moins de 3000 h, + 12,9 % de risque en cas de volume compris entre 3000 et 6000 h, + 19,4 % de risque si > 6000 h (56). Le volume d'entraînement semble donc jouer un rôle important dans l'incidence de la FA dans cette cohorte.

2. Cardiopathies dilatées

Dans cet article de 1999, Pelliccia et al. s'intéressent aux dimensions du ventricule gauche dans un échantillon d'athlètes de niveau olympique et provenant de 38 sports différents, soit un total de 1309 athlètes élités dont 957 hommes (57). Les évaluations sont réalisées en échographie et montrent que 45 % des athlètes, tous sexes confondus, ont des dimensions du VG supérieures à la normale (≥ 55 mm). On note même que 185 athlètes ont une taille du VG mesurée en fin de diastole qui excède les 60 mm, ce qui représente 14 % de l'échantillon total. Les auteurs se sont également intéressés à la nature des sports qui étaient les plus pourvoyeurs de telles dilatations. Il en ressort notamment que le cyclisme, le hockey sur glace, le basket, le rugby, le canyoning et l'aviron arrivent en tête. 70 % des athlètes de cet échantillon ont été suivis entre 1 et 12 ans après cette étude. Il n'a pas été mis en évidence de dysfonction systolique globale du ventricule gauche ni même de troubles de sa cinétique. Aucun volontaire n'a développé par la suite de symptômes cardiologiques ou d'arguments cliniques évidents de cardiomyopathie dilatée (CMD) non plus.

Cinq années plus tard, Abergel et al. étudient les adaptations à long terme du ventricule gauche chez d'anciens cyclistes du Tour de France 1995 et 1998 versus contrôle (58). Il est notamment démontré dans cette large cohorte homogène que la dilatation du ventricule gauche est fréquente et qu'elle est souvent associée à une fraction d'éjection systolique du ventricule gauche (FEVG) basse, parfois inférieure à 52 %. De plus, il est observé une augmentation anormale quoique modérée, de l'épaisseur du VG. Ces observations posent donc la question du développement d'une cardiomyopathie dilatée chez ces athlètes à (trop ?) hauts volumes d'entraînement et même de l'implication éventuelle de certaines interventions pharmacologiques associées, dans le cadre du dopage médicamenteux par exemple.

Encore une fois, on constate, par le biais de ces deux études, qu'il est toujours difficile de se positionner en faveur d'une issue physiologique ou pathologique chez ces athlètes hautement entraînés.

Ainsi, Kasikcioglu et al. s'intéressent en 2006 à cette dualité et se proposent d'étudier les paramètres systoliques et diastoliques en échographie chez des athlètes d'endurance de plus de 35 ans, dont l'évaluation cardiaque est en faveur d'une possible cardiopathie dilatée (59). A noter qu'il n'est pas précisé quel sport pratiquaient ces volontaires. Leurs paramètres cardiaques sont comparés avec ceux de patients présentant cette pathologie (diagnostic positif si diamètre télédiastolique du ventricule gauche > 60 mm) d'origine idiopathique, ainsi qu'avec ceux d'une population contrôle en bonne santé et non sportive. 21 athlètes parmi les 71 retenus soit 19,7 % présentaient un diamètre télédiastolique du VG supérieur à 60 mm. Les auteurs ont mesuré les différents paramètres selon les recommandations de l'*American Society of Echocardiography* et en ont conclu que les patients avec une CMD avaient des vitesses systoliques et diastoliques diminuées par rapport aux athlètes et aux personnes contrôle. Ils ont également constaté que le rapport E/E_m chez les athlètes était significativement diminué par rapport à celui des patients et des personnes contrôle. Le rapport E/E_m , plus connu sous la forme E/E_a en France et avec un *cut-off* de 1.5, est un rapport de vitesses du flux sanguin intracardiaque dans le cœur gauche qui caractérise le jeu de pressions diastoliques ou de remplissage du VG. Il s'avère donc être, dans cette étude, le meilleur paramètre pour différencier une dilatation cardiaque physiologique d'une dilatation cardiaque pathologique, avec une sensibilité de 86 % et une spécificité de 93 %.

3. Fibrose myocardique

Une autre complication à redouter chez ces athlètes à haut niveau d'entraînement est la fibrose myocardique. Cette fibrose doit être considérée comme une séquelle d'une blessure myocardique générée par de hauts volumes d'entraînement ou encore par des épreuves de longue durée à haute intensité, comme le marathon par exemple. On en retrouve une certaine forme dans le cas des dysplasies arythmogènes du ventricule droit abordées un peu plus haut, tandis que d'autres auteurs décrivent une entité qui peut impacter le ventricule gauche.

Dans cette étude multicentrique parue en 2011, Wilson et al. étudient les paramètres cardiaques, tant au niveau structurel que fonctionnel, de 12 athlètes de sexe masculin et de plus de 50 ans, qui ont pratiqué des sports d'endurance tout au long de leur vie y compris en compétition (60). Les auteurs souhaitaient comparer leurs résultats avec ceux obtenus chez 20 volontaires appariés sur le sexe et l'âge, et avec ceux obtenus chez 17 athlètes d'endurance dont l'âge était compris entre 26 et 40 ans. Les mesures ont été réalisées par le biais de la CMR et la fibrose myocardique a été recherchée après injection de gadolinium, utilisant ainsi la technique de *Late Gadolinium Enhancement* (LGE).

Une partie de leur conclusion montre que six des 12 athlètes vétérans soit 50 % présentaient un rehaussement tardif après injection de gadolinium, en faveur d'une fibrose myocardique, et ce comparativement avec les vétérans contrôle et les jeunes athlètes qui en étaient indemnes. Les auteurs indiquent également que la présence de LGE chez les athlètes vétérans est significativement associée au nombre d'années passées à s'entraîner ainsi qu'au nombre de marathons et de courses d'ultra-endurance courues.

Dans une autre série de neuf cas, Eijsvogels et al. proposent de comparer les paramètres cardiaques d'athlètes d'endurance vétérans, dont quatre présentaient des localisations de fibrose myocardique (61). Cette fibrose était localisée à proximité des points d'insertion du ventricule droit, dans la paroi libre du ventricule gauche chez trois athlètes, tandis qu'elle était localisée au niveau subépicardique de la paroi latérale du VG chez le quatrième. Tous les quatre présentaient une augmentation du volume télédiastolique ainsi que de l'épaisseur du mur postérieur du VG, comparativement aux athlètes sans fibrose. L'utilisation de l'échocardiographie transthoracique a pu démontrer que la fibrose n'avait pas d'impact sur la contraction des tissus ou sur le *strain* longitudinal global, mais que le *strain* longitudinal segmentaire semblait altéré dans certaines régions fibrotiques. Au vu du petit nombre de cas étudiés, les auteurs préfèrent rester prudents quant à leurs conclusions et aux implications cliniques.

Toutefois, ces observations semblent être confirmées par cette étude de Tahir et al. publiée en 2019 portant sur 78 triathlètes asymptomatiques et leurs 28 volontaires contrôle appariés sur l'âge (62). Les différents paramètres ont été analysés en CMR, y compris pour les mesures du strain. 15 des 78 triathlètes soit 19 % présentaient un LGE focal d'origine non ischémique, avec une prédominance pour les segments basaux et inféro-latéraux. Bien que la FEVG soit normale dans les deux groupes – triathlètes avec et sans fibrose – les auteurs ont observé un *strain* radial global inférieur dans le groupe avec fibrose. De plus, ils ont observé des différences régionales dans l'analyse du *strain* chez les contrôles pour les segments inféro-latéraux, ces mêmes segments étant préférentiellement touchés par la fibrose chez les triathlètes. Les auteurs concluent en suggérant que la fibrose myocardique a un impact négatif sur la fonction du ventricule gauche chez ces triathlètes asymptomatiques à FEVG normale. Pour eux, il serait intéressant de réaliser des études longitudinales pour analyser les effets à long terme de ces altérations du strain sur la fonction myocardique et le développement de symptômes cliniques d'insuffisance cardiaque. Il est d'ailleurs pertinent de mentionner que ces zones préférentielles de fibrose – à savoir, points d'insertion des deux ventricules, septum interventriculaire ou paroi inféro-latérale du VG – ont également été mis en évidence dans une autre étude de Malek et al., portant cette fois-ci sur 30 coureurs d'ultramarathon (63).

Malheureusement, il faut garder à l'esprit que certaines formes de dopage médicamenteux peuvent induire des risques cardio-vasculaires potentiellement létaux, comme le rappellent Thiblin et al. dans leur étude publiée en 2000, sur la responsabilité des stéroïdes anabolisants chez 34 hommes décédés entre 20 et 45 ans (64). Douze d'entre eux présentaient une pathologie cardiaque chronique dont sept avec une hypertrophie, cinq avec une fibrose myocardique et deux avec des zones de nécrose. Dans sa présentation intitulée « Dopage, attention danger ! » lors du Congrès Cœur et Sport d'Avignon en 2018, le Dr Sarah WINTER de l'Hôpital Edouard Herriot de Lyon fait d'ailleurs un résumé des effets cardio-vasculaires induits par l'utilisation de certaines substances dopantes comme l'hormone de croissance, les amphétamines ou encore les β 2-mimétiques.

Ces foyers de fibrose s'avèrent donc problématiques puisqu'ils peuvent être le siège de foyers de réentrée de l'onde de dépolarisation, et ainsi conduire à des troubles du rythme cardiaque au niveau ventriculaire parfois dramatiques, comme le rappellent O'Keefe et al. dans leur revue de la littérature publiée en 2012 sur les potentiels effets cardio-vasculaires délétères de l'entraînement excessif en endurance (65). Au même titre que pour les cardiopathies arythmogènes et dilatées, ces remaniements semblent être au moins fonction de la charge d'entraînement subie par le muscle cardiaque, charge qui comprend également l'intensité de l'exercice en plus du nombre d'heures

passées à s'entraîner au cours d'une vie. Il semblerait donc être intéressant de définir dans quelles mesures ces athlètes seraient prédisposés à un tel remodelage pathologique, et de les suivre de façon longitudinale afin de prendre la décision de diminuer leur pratique sportive à un instant donné et ainsi, limiter l'évolution délétère vers de telles pathologies. Le recours à la CMR dans ce contexte particulier semble donc être un outil incontournable pour trancher en cas de « zone grise », entre ce qui doit être considéré comme physiologique et ce qui doit être considéré comme pathologique chez un sportif, comme le rappellent Maestrini et al. dans leur étude publiée en 2020 (66).

Toutefois, l'intérêt de la CMR peut ne pas se limiter à l'exploration plus précise du remodelage cardiaque chez le sportif. En effet, cette technique d'imagerie s'avère être un atout considérable dans l'évaluation concomitante des paramètres cardiaques mais également des paramètres vasculaires, sous-entendu des gros vaisseaux. Nous savons que certaines pathologies du ventricule gauche peuvent impacter le bon fonctionnement de l'aorte, et vice versa. Par exemple, une bicuspidie aortique va amorcer l'existence d'un anévrisme de l'aorte thoracique ascendante, tandis qu'une sténose aortique va contribuer à l'hypertrophie du VG. Ces deux exemples illustrent l'existence d'une potentielle interaction forte, y compris en termes de fonctionnement au sein de la pompe cardiaque, entre le ventricule gauche et l'aorte. Dans ce contexte, si remodelage cardiaque lié au sport il existe, alors il devrait probablement exister aussi un remodelage vasculaire lié au sport. La CMR aurait donc un rôle important à jouer dans l'exploration de ce – relativement nouveau – domaine de recherche en physiologie cardio-vasculaire liée à la pratique sportive.

IV. Remodelage vasculaire et sport

En tant que médecin du sport, nous focalisons notre attention en premier lieu sur la bonne santé cardio-vasculaire du pratiquant. En réalité, nous nous focalisons plutôt sur sa bonne santé cardiaque « tout court » car nous nous intéressons davantage au bon fonctionnement du cœur d'un sportif qu'à ses artères, qu'elles soient périphériques ou un peu plus centrales comme l'aorte, ce « parent pauvre » de la cardiologie comme on pourrait l'appeler. Longtemps délaissée par la recherche en cardiologie du sport, quelques équipes se consacrent un peu plus depuis une petite dizaine d'années à l'étude de l'impact de la pratique sportive sur l'aorte. En effet, il y a 40 ans déjà, certains scientifiques ont pu mettre en évidence l'existence d'un véritable « lien de fonctionnement » entre le ventricule gauche et l'aorte, plus connu sous le terme de couplage ventriculo-aortique.

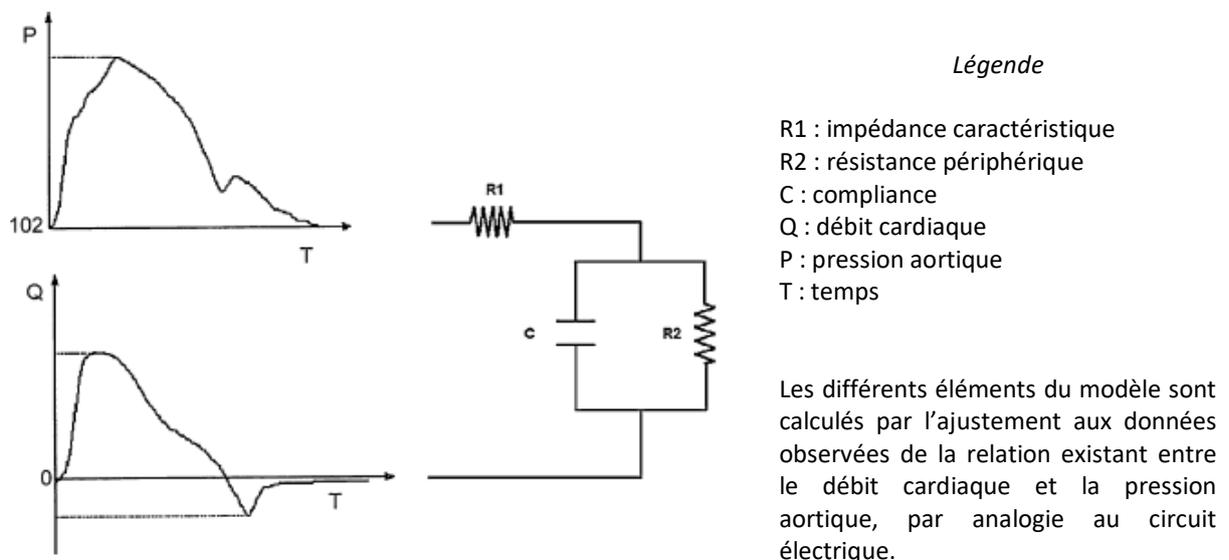
A. Notion de couplage ventriculo-aortique

Le couplage ventriculo-aortique – sous-entendu gauche – se définit comme l'interaction entre le ventricule gauche et le système vasculaire représenté par l'aorte. Leur fonctionnement est alors assimilé respectivement à une pompe et une charge, soit la relation pression-volume, et va déterminer la performance VG globale.

Les premiers travaux sur le couplage ventriculo-aortique référencés au niveau international sont ceux de Sunagawa et al. en 1983, un des auteurs majeurs sur le sujet (67). Dans cette étude réalisée sur des ventricules de chiens, les auteurs cherchent à prédire le volume d'éjection (VE) du ventricule gauche, encore appelé *stroke volume* (SV), qui résulte de l'interaction complexe entre le ventricule et son système artériel. Pour eux, il existe une relation forte entre les pressions qui règnent en fin de systole dans le ventricule gauche et dans le système artériel, et le volume d'éjection. Leurs mesures vont montrer une forte corrélation entre les deux entités, ce qui confirme leur hypothèse de départ. Dans leurs travaux de 1984, Sunagawa et al. précisent leur modèle théorique de couplage ventriculo-artériel pour lequel ils assimilent les propriétés du ventricule et de l'arbre vasculaire à deux chambres élastiques (68).

Dans leur article de 2009, Morimont et al. détaillent de façon plus explicite les aspects théoriques de ce couplage (69). Le système ventriculaire peut se voir comme une chambre à élastance variable. L'élastance se définit comme le rapport entre la variation de pression et la variation de volume d'une paroi plus ou moins élastique. Ce terme d'élastance peut s'opposer à celui de compliance. En d'autres termes, elle reflète la résistance à l'augmentation du volume de l'organe étudié et peut s'appliquer aux ventricules, à un vaisseau ou encore au poumon. Dans le cas du système ventriculaire, celui-ci est caractérisé par l'élastance télésystolique notée Ees. Cette dernière illustre la contractilité ventriculaire et est indépendante des conditions de charge. Dans le système vasculaire, on s'intéresse à l'impédance d'entrée de l'aorte ascendante, c'est-à-dire la résistance à l'écoulement du sang, en l'occurrence à la sortie du ventricule gauche. En effet, et ce grâce aux travaux de Nichols et al., ce paramètre décrit de la façon la plus complète la charge hydraulique à laquelle le ventricule est confronté car il tient compte du caractère pulsatile et des réflexions d'onde dans tout l'arbre vasculaire (70,71). Étant un nombre complexe, il faut utiliser un modèle Windkessel à trois (**figure 1-19**) ou quatre éléments pour calculer séparément les différentes composantes de cette impédance, à savoir la résistance des gros vaisseaux, la résistance périphérique et la compliance (72).

Figure 1-19. Représentation d'un modèle Windkessel à trois éléments, d'après Morimont et al., 2009 (69)



Cependant, Sagawa et al. ont pu démontrer que l'élastance artérielle notée Ea peut aussi être calculée par le rapport de Pes/SV , soit le rapport de la pression télésystolique sur le volume éjecté (73). Par conséquent, la performance de la pompe ventriculaire peut ainsi être décrite par les deux droites d'élastance définies par les équations suivantes :

$$Ees = \frac{(Ves - V^{\circ})}{Pes} = \frac{(Ved - V^{\circ} - SV)}{Pes} \qquad Ea = \frac{Pes}{SV}$$

Avec Pes et Ves la pression et le volume au sein du ventricule en fin de systole

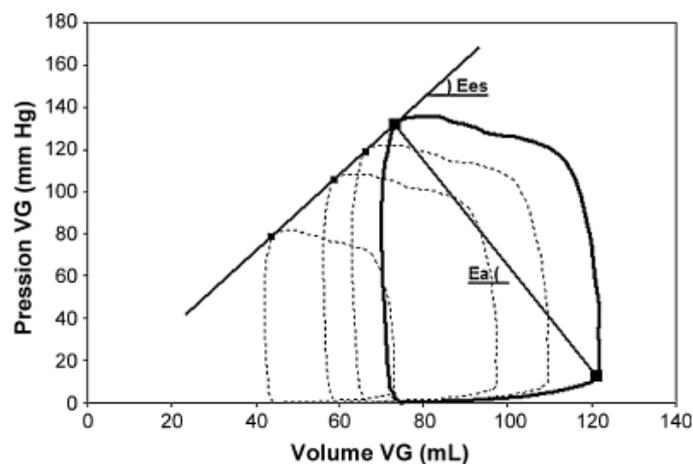
Ved le volume du ventricule en fin de diastole

SV le volume éjecté, ou *stroke volume*

V° l'intersection de la droite $Pes = Ees(Ves - V^{\circ})$ avec l'axe des abscisses

La **figure 1-20** explicite la détermination de ces droites grâce à l'utilisation de courbes pression-volume mesurées dans le ventricule gauche.

Figure 1-20. Détermination des droites d'élastances ventriculaire (Ees) et artérielle (Ea) grâce aux courbes pression-volume du ventricule gauche, à différents niveaux de charge, d'après Morimont et al., 2009 (69)

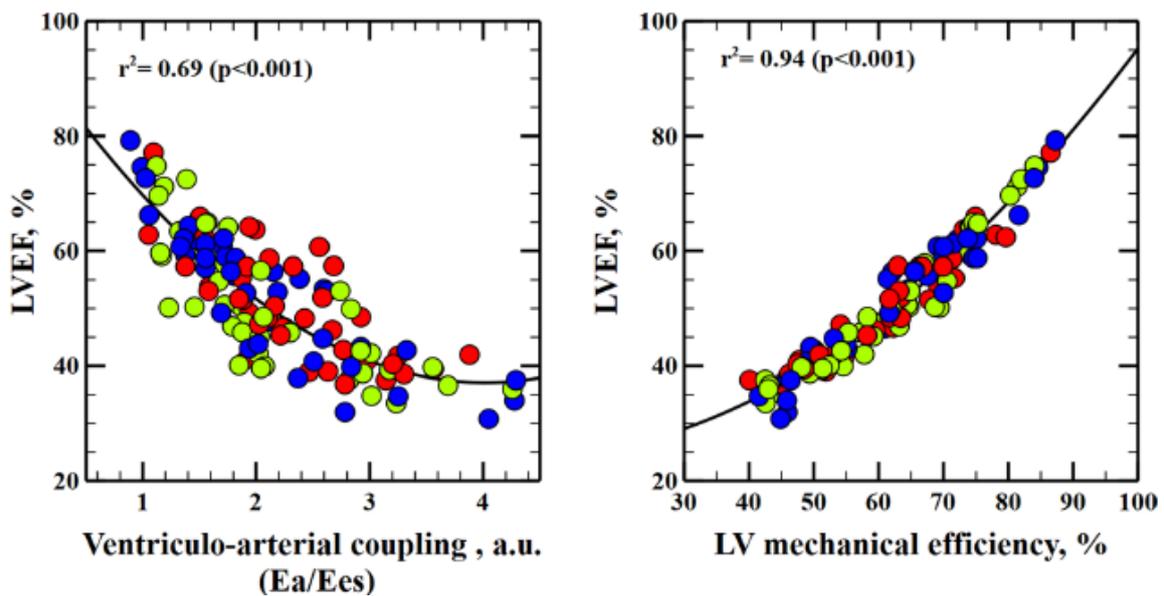


Le point de fonctionnement du système, aussi appelé couplage, correspond à l'intersection de ces deux droites d'élastance E_{es} et E_a , et fixe le volume éjecté correspondant à P_{es} tel que :

$$SV = \frac{E_{es}(V_{ed} - V^o)}{(E_{es} + E_a)}$$

Plus concrètement, Mongo Garcia et al. montrent dans leur étude parue en 2019 qu'il existe, grâce à l'analyse par régression linéaire, une corrélation forte entre le couplage ventriculo-aortique noté E_a/E_{es} et la fraction d'éjection du ventricule gauche (FEVG) (74). De plus, une seconde corrélation est établie entre la FEVG et l'efficacité mécanique du ventricule gauche, calculée selon le ratio du volume d'éjection et de la surface sous la courbe de la boucle pression-volume du VG (**figure 1-21**).

Figure 1-21. Modélisation de la relation entre couplage ventriculo-artériel et FEVG (à gauche), et entre efficacité mécanique du ventricule gauche et FEVG (à droite), d'après Mongo Garcia et al., 2019 (74)



Les cercles de couleur représentent les interventions expérimentales menées pour déterminer les différentes valeurs du couplage ventriculo-artériel et de l'efficacité mécanique :

rouge = post-charge ; vert = pré-charge ; bleu = contractilité

Pour finir, la détermination du couplage ventriculo-artériel permet d'apprécier l'efficacité du transfert d'énergie du myocarde vers le système artériel. Le couplage ventriculo-artériel est donc un élément déterminant de la performance cardiaque. Étant donné que son évaluation devient accessible en routine, le couplage ventriculo-artériel pourrait donc aider le spécialiste en réanimation par exemple, à adapter et optimiser le traitement selon les conditions hémodynamiques de son patient (69).

Plusieurs études montrent une altération de ce couplage en cas de pathologie, telle qu'une cardiopathie dilatée ou hypertensive, ou encore un sepsis. Mais qu'en est-il en cas de pratique sportive ?

Intéressons-nous tout d'abord à l'apport d'un modèle d'étude du couplage ventriculo-aortique chez le rat présentant une hypertrophie cardiaque après un entraînement de douze semaines de natation (75). Le remodelage cardiaque a été confirmé par échographie. Les différentes mesures hémodynamiques réalisées de manière invasive ont montré une diminution du volume du ventricule gauche en fin de systole, augmentant de ce fait le volume d'éjection et la fraction d'éjection chez les rats entraînés. Les indices de contractilité, dérivés de la boucle pression-volume et indépendants de la charge, se sont avérés significativement accrus. Par conséquent, le couplage ventriculo-artériel est amélioré chez ces rats sportifs et reflète donc l'amélioration de la mécano-énergétique du muscle cardiaque hypertrophié suite à un programme d'entraînement. De plus, il semblerait que la relaxation active du ventricule gauche soit améliorée également. Cette étude parue en 2013 apparaît donc comme le premier modèle animal permettant de mettre en évidence les adaptations fonctionnelles et hémodynamiques impliquées par le remodelage cardiaque post-exercice.

Cependant, dès 1990, Asanoi et al. s'étaient penchés sur les modifications générées par deux types d'exercice – à savoir l'exercice aérobie et l'exercice anaérobie – sur le couplage ventriculo-aortique (76). Les « limites » de ces deux types d'exercice ont été déterminées par analyse gazométrique lors d'une épreuve d'effort. En supposant que le paramètre V^0 restait inchangé durant l'exercice et ce par rapport à l'état de repos, l'élastance ventriculaire (E_{es}) et l'élastance artérielle (E_a) ont été déterminées pendant l'épreuve d'effort, au cours de laquelle était mesurée la pression artérielle et réalisée l'échocardiographie. Pendant l'exercice aérobie, une augmentation du volume du ventricule gauche en fin de diastole et la tendance à la diminution de la pression systolique finale ont provoqué

une baisse significative de l'élastance artérielle de 30 %, sans modification significative de l'élastance ventriculaire. Par conséquent, le rapport E_a/E_{es} , qui est corrélé de façon inverse avec l'efficacité de la pompe ventriculaire gauche, a diminué de 35 %. Pendant l'exercice anaérobie, l'élastance artérielle est restée la même que pendant l'exercice aérobie, mais l'élastance ventriculaire a augmenté de façon significative de 89 %, ce qui a entraîné la diminution du rapport E_a/E_{es} de 54 %. Par conséquent, il existe une diminution du couplage ventriculo-artériel pendant l'exercice ce qui est en faveur d'une augmentation de l'efficacité de la pompe cardiaque. Cette conclusion s'explique par une diminution des conditions de charge pendant l'exercice aérobie du fait de la diminution de l'élastance artérielle, et par la contractilité accrue du ventricule gauche compte tenu d'une augmentation de l'élastance ventriculaire. Ces observations ont été confirmées par une seconde étude de cette même équipe de recherche, publiée deux ans plus tard (76).

Poursuivons avec une étude parue en 2010 de Florescu et al. qui se sont intéressés à l'impact du cœur d'athlète sur la fonction cardiaque, et plus précisément sur les fonctions artérielle et endothéliale chez les athlètes d'endurance (77). Partant du fait qu'un cœur d'athlète est associé à une hypertrophie du ventricule gauche ainsi qu'à une fonction cardiaque supranormale pouvant être assimilée à un processus physiologique, les auteurs suggèrent que d'autres mécanismes comme un meilleur couplage ventriculo-aortique peuvent expliquer cette amélioration de la fonction cardiaque. Les volontaires de cette étude ont donc été soumis à des mesures échocardiographiques et biologiques. Il est apparu que les athlètes avaient une meilleure vélocité du flux ventriculaire gauche mesuré en systole et de façon longitudinale que les contrôles, tandis que la fraction d'éjection systolique et la vitesse du flux sanguin myocardique mesuré en petit axe étaient similaires par rapport au groupe témoin. De plus, les athlètes avaient une rigidité artérielle plus basse mais un meilleur couplage ventriculo-aortique déterminé en *echotracking* par la mesure de l'amplitude de l'onde de compression. Les biomarqueurs du stress oxydatif étaient également plus bas que chez les contrôles. L'analyse statistique a finalement montré une corrélation directe entre la fonction longitudinale du ventricule gauche, c'est-à-dire une vélocité plus rapide du flux sanguin myocardique, et le couplage ventriculo-artériel. Cette relation était toutefois inversement proportionnelle à la rigidité artérielle et au stress oxydatif. Par conséquent, ces athlètes avec un remodelage cardiaque important, montraient une meilleure fonction artérielle et endothéliale due à un stress oxydatif plus bas, et associée à une optimisation du couplage ventriculo-artériel. Dans ces conditions, il est donc possible d'affirmer que le cœur d'athlète est bien un phénomène physiologique compte tenu d'une fonction cardiaque supranormale.

Cependant, Sahlén et al. appellent à rester vigilants quant à l'optimisation du couplage ventriculo-artériel à l'effort chez le sportif, dans cette étude parue en 2012 (78). En effet, à l'issue de compétitions d'endurance comme le marathon, les ultratrails ou encore les triathlons longue distance, certains athlètes ont une élévation de leurs marqueurs cardiaques comme les troponines ou le NT-proBNP. Les volontaires ont donc réalisé en décubitus dorsal une épreuve d'effort sur cycloergomètre. Les différentes mesures cardiaques ont été réalisées grâce à l'échocardiographie tandis que les autres paramètres impliqués dans le couplage ventriculo-aortique notamment ont fait appel en plus à des mesures brachiales de pression artérielle. Entre le groupe à marqueurs élevés (HIGH) et le groupe à marqueurs bas (LOW), les mesures du couplage ventriculo-aortique étaient semblables au repos. Cependant, à l'effort, le groupe HIGH a montré une diminution du couplage ventriculo-aortique due à une augmentation isolée de l'élastance ventriculaire, tandis que les individus du groupe LOW présentaient une élévation plus importante de leur élastance artérielle, maintenant de ce fait un couplage ventriculo-aortique optimal. Parallèlement, ces mêmes volontaires du groupe HIGH présentaient une plus grande contrainte pariétale pendant l'exercice. Par conséquent, les athlètes qui montrent une libération plus élevée de biomarqueurs cardiaques lors d'un exercice physique, affichent une altération du couplage ventriculo-artériel. Cette observation peut donc refléter un travail cardiaque non adapté à la charge exigée par ce type d'effort.

Il est toutefois nécessaire de se pencher sur les modifications du couplage ventriculo-artériel à l'exercice chez des patients présentant des pathologies cardiaques, pour en comprendre l'importance chez le sportif aguerri. Dans cette première étude parue en 2012, Tartière-Kesri et al. s'intéressent à la réponse cardiaque chez des patients insuffisants cardiaques à fraction d'éjection préservée et ayant des troubles de la relaxation, soumis à un exercice d'intensité modérée (79). Les différents paramètres ont été mesurés en échocardiographie et en tonométrie, ou calculés. Par rapport aux contrôles, ces patients montraient d'ores et déjà des troubles modérés du couplage ventriculo-aortique au repos. À l'exercice, les auteurs ont enregistré notamment une augmentation de l'élastance artérielle et une diminution du volume d'éjection systolique et ce, malgré une élévation de l'élastance ventriculaire. De plus, le module carotidien de Peterson (Ep^*) a été mesuré et s'est retrouvé nettement majoré (+ 155 %) à l'effort chez ces patients cardiaques (80).

Le module carotidien de Peterson noté Ep^ a été décrit par Peterson en 1960. Il est également appelé module élastique de pression et s'exprime en dyne/cm^2 selon le rapport $\frac{\Delta P}{\frac{\Delta D}{D}}$ avec :*

ΔP , la variation de pression se produisant entre chaque cycle cardiaque, c'est-à-dire entre la pression systolique et la pression diastolique ;

ΔD , l'oscillation du diamètre du vaisseau étudié au cours de chaque cycle cardiaque, c'est-à-dire entre son diamètre maximal en systole et son diamètre minimal en diastole ;

D , le diamètre moyen du vaisseau étudié, ou encore son diamètre en diastole.

Par conséquent, l'adaptation du couplage ventriculo-artériel proximal défini par le rapport Ees/Ea ou Ees/Ep , était inadéquate à l'exercice chez ces patients. Rappelons qu'il n'existait aucune différence au repos entre les deux groupes étudiés pour l'étude du couplage ventriculo-artériel, que nous qualifierons de global dans ce cas. Les auteurs en concluent que l'exercice modéré entraîne une forte augmentation de la post-charge proximale, post-charge qui est sous-estimée au repos. De plus, cette altération hémodynamique est associée à un couplage ventriculo-artériel défavorable ce qui va conduire à une intolérance à l'exercice si ce dernier s'avère être plus intensif.

Dans cette seconde étude parue en 2014, Vizzardi et al. proposent d'étudier la rigidité aortique, connue comme un facteur indépendant de prédiction de la mortalité liée aux événements cardiovasculaires, chez les patients insuffisants cardiaques ou présentant une cardiomyopathie dilatée d'origine non ischémique (81). Chaque patient a bénéficié d'une échocardiographie et d'une épreuve d'effort, examens au cours desquels les propriétés de l'aorte ascendante ont été déterminées. Outre une fraction d'éjection du ventricule gauche moyenne de $35,2 \pm 7,7$ %, les performances fonctionnelles cardiorespiratoires ont été altérées chez ces patients. De plus, il a été trouvé une corrélation négative significative entre le pic de VO_2 et l'index de rigidité aortique. Autrement dit, une rigidité aortique élevée pourrait être considérée comme un facteur de mauvais pronostic sur le plan fonctionnel chez l'insuffisant cardiaque, bien qu'aucun mécanisme physiopathologique n'ait pu être mis en évidence pour expliquer ce lien de causalité. Les auteurs rappellent d'ailleurs que les propriétés élastiques de l'aorte sont cruciales pour permettre un couplage ventriculo-artériel optimal. Par conséquent, une aorte rigide a un impact négatif sur la fonction cardiaque et sur la capacité fonctionnelle des patients insuffisants cardiaques chroniques par le biais de différents mécanismes physiopathologiques (82). Vizzardi et al., nombreuses études à l'appui, expliquent en quoi une aorte rigide donc peu compliant est un fardeau pour le travail cardiaque, que ce soit à l'effort ou davantage chez des patients porteurs de cardiomyopathies.

Par le biais de cette bibliographie sur le couplage ventriculo-aortique, on comprend donc plus facilement que le travail cardiaque est intimement lié à la compliance aortique, et réciproquement. Ce constat prend tout son sens chez les patients dont l'hémodynamique est altérée de façon aiguë ou chronique, mais ne doit pas être négligé chez le sportif assidu qui va présenter un remodelage cardiaque important. L'hypothèse d'un probable remodelage vasculaire associé dans cette population particulière mérite donc qu'on s'y intéresse.

B. Vers l'existence d'un remodelage vasculaire

Dès les années 1960, de nombreuses équipes se sont intéressées à l'impact bénéfique de la pratique d'une activité physique adaptée à des fins de santé. A l'heure actuelle, on dénombre près de 38 000 publications via le moteur de recherche Pubmed, avec une accélération du nombre de parutions annuelles vers le milieu des années 2000. Il est donc pleinement acté qu'une augmentation de son volume d'activité physique, ne serait-ce que de marcher d'un pas rapide pendant 30 minutes à raison de cinq fois par semaine par exemple, permet de diminuer sa morbidité et sa mortalité cardio-vasculaire (83). Nous avons vu précédemment que la pratique d'un sport de façon soutenue, régulière et prolongée dans le temps, s'accompagnait de modifications cardiologiques morphologiques et fonctionnelles. Mais qu'en est-il sur le plan vasculaire ? Au vu de l'existence du couplage ventriculo-artériel, il devrait exister également des adaptations des vaisseaux liées à la pratique sportive.

Pour Cavalcante et al., la rigidité artérielle est l'une des premières manifestations détectables des changements structurels et fonctionnels défavorables au sein de la paroi du vaisseau (84). La structure de chaque artère varie en fonction de son site anatomique et de ses sollicitations, tant en termes de réservoir que de conducteur selon le principe de Windkessel. Les grosses artères comme l'aorte jouent un rôle essentiel en fournissant un « tampon » vasculaire adéquat et adapté à la contraction ventriculaire grâce au couplage ventriculo-artériel. L'aorte thoracique dite proximale est riche en élastine, ce qui lui permet de s'adapter au mieux aux contraintes hémodynamiques générées par le ventricule, alors que les artères les plus distales sont plus riches en collagène et

deviennent ainsi progressivement plus rigides. La rigidité doit donc se comprendre comme la résistance à la déformation. Les mesures de rigidité artérielle dépendent de trois variables indépendantes et interdépendantes qui sont l'élastance, l'épaisseur de la paroi vasculaire et le rayon du vaisseau. On définit donc la Vitesse de l'Onde de Pouls pour évaluer la rigidité artérielle selon l'équation suivante :

$$PWV = \sqrt{\frac{E \times h}{2 \times r \times \rho}}$$

avec PWV : la *Pulse Wave Velocity*, ou la Vitesse de l'Onde de Pouls (VOP)

E : le module élastique du vaisseau

h : l'épaisseur pariétale du vaisseau

r : le rayon du vaisseau

ρ : la densité du sang

À noter que la VOP n'est pas particulièrement sensible aux changements de dimension ou d'épaisseur du vaisseau. La rigidité aortique dépend davantage de l'interaction entre les cellules des muscles lisses de l'aorte et de la matrice extracellulaire contenant notamment les fibres d'élastine et de collagène (85,86).

Un autre paramètre peut également être étudié : il s'agit de la compliance artérielle notée C. Celle-ci résulte du rapport de la variation du diamètre de l'artère notée ΔD sur une variation de pression donnée notée ΔP , pour une longueur fixe de vaisseau. Elle s'exprime de la façon suivante :

$$C = \frac{\Delta D}{\Delta P}$$

D'autres auteurs comme Lehmann ou Asmar ont proposé que la compliance aortique et sa distensibilité résultent respectivement des changements absolu et relatif des variations de section aortique. Soit :

$$Compliance\ Aortique = \frac{A_{max} - A_{min}}{Pression\ Pulsée\ Centrale}$$

avec A_{max} , la section aortique maximale

A_{min} , la section aortique minimale

Ou encore :

$$Distensibilité\ Aortique = \frac{A_{max} - A_{min}}{A_{min} \times Pression\ Pulsée\ Centrale}$$

Enfin, la distensibilité que nous noterons Da ici, est définie quant à elle par la compliance relative ou encore les changements relatifs en diamètre, surface et pression, qui s'exercent au sein de l'aorte – sous-entendue ici. Elle est l'inverse de l'élastance et peut se déterminer de la manière suivante :

$$Da = \left(\frac{3,57}{PWV} \right)^2$$

avec PWV : la vitesse de l'onde de pouls

Pour terminer, il est important de noter que la vitesse de l'onde de pouls est le gold standard pour quantifier de façon non invasive la rigidité artérielle. Elle est considérée comme l'indice de référence compte tenu de sa simplicité, de sa précision, de sa reproductibilité et de sa forte capacité à prédire les effets indésirables. Elle peut être déterminée en mesurant le temps de transit de l'onde de pouls noté Δt entre deux sites de mesure définis le long d'un segment vasculaire noté Δd telle que :

$$VOP = PWV = \frac{\Delta d}{\Delta t}$$

Même si la vitesse de l'onde de pouls est liée de façon inverse à la compliance vasculaire, il ne faut pas négliger le fait que la VOP est une mesure fonctionnelle régionale de la rigidité artérielle pour une longueur d'artère donnée, tandis que la compliance et la distensibilité artérielles sont des marqueurs locaux de l'élasticité (ou de la rigidité) artérielle.

Dès 1993, Vaitkevicius et al. s'intéressent à l'effet de l'âge et de la capacité aérobie sur la rigidité artérielle chez des adultes en bonne santé (87). Pour cela, les auteurs ont recruté 146 hommes et femmes strictement indemnes de pathologies cardio-vasculaires. Parallèlement, 14 hommes bien entraînés en endurance ont pris également part à cette étude. Les mesures d'index d'augmentation artérielle et de vitesse de l'onde de pouls ont été mesurées par tonométrie d'aplanation. Il est montré dans cette étude que les deux paramètres vasculaires augmentent jusqu'à cinq fois avec l'âge, et ce malgré une augmentation limitée de 14 % de la pression artérielle systolique. Cependant, ces mêmes paramètres vasculaires varient de façon inverse avec la VO_2 max. Par ailleurs, chez les sportifs d'endurance, ces indicateurs de rigidité artérielle étaient significativement réduits par rapport aux volontaires sédentaires appariés sur l'âge et qui présentaient des tensions artérielles similaires. Par conséquent, les auteurs en concluent que, chez des personnes normotendues, il existe une augmentation importante de la rigidité artérielle liée à l'âge, et qui peut être contrebalancée par la pratique d'une activité physique régulière de type endurance. Ils suggèrent également que l'amélioration de la capacité aérobie, via un entraînement en endurance, permettrait d'atténuer la rigidité artérielle liée au vieillissement normal de l'individu.

Les travaux de Ahmadi-Abhari et al. parus en 2017 confirment l'impact bénéfique d'une activité physique pratiquée de façon régulière et prolongée dans le temps, y compris chez les personnes qui étaient initialement sédentaires (88). La cohorte de départ comptait plus de 10 000 personnes âgées de 35 à 55 ans au moment de leur recrutement en 1985. La présente étude a inclus 5200 participants environ, qui avaient bénéficié au moins une fois d'une évaluation par mesure de la vitesse de l'onde de pouls au cours de la période 2008-2009 et/ou de la période 2012-2013. Cette étude prospective a donc permis de montrer que la pratique d'activités physiques d'intensité modérée à élevée comme le cyclisme, la natation, ou le football, était associée à une augmentation plus lente de la rigidité artérielle au cours du temps. Cette tendance n'a pas été retrouvée chez les personnes actives à des niveaux d'intensité moindre, qui pratiquaient notamment les tâches ménagères, le jardinage ou encore le bricolage. L'analyse de ces changements en termes de pratique d'une activité physique, liés aux variations de la VOP, suggère qu'un cinquième de l'effet de l'âge sur la rigidité artérielle peut être prévenu par une augmentation de la pratique sportive de façon adaptée.

Mais dès 1998, certaines équipes s'intéressaient déjà à l'impact de l'entraînement en endurance sur les paramètres vasculaires. Miyachi et al. ont étudié les surfaces de l'aorte ascendante et de l'aorte abdominale par échographie dans une très petite cohorte de sept sportifs d'endurance et de cinq contrôles (89). Ces éléments ont été mesurés sur un cycloergomètre en position couchée à différents niveaux d'intensité et ce, avant et après un entraînement de huit semaines pour le groupe test uniquement. De façon simultanée, les vitesses et les débits ont été mesurés en écho-Doppler au niveau de l'aorte ascendante. Il est apparu que les sections aortiques de l'aorte ascendante et de l'aorte abdominale après l'entraînement avaient augmenté dans le groupe test, tout comme les volumes per-exercice et ce quelle que soit l'intensité, mais cette fois-ci uniquement au niveau de l'aorte ascendante. Aucune modification n'a été identifiée dans le groupe contrôle. Les auteurs constatent donc que l'aorte thoracique, dite vaisseau de conductance, s'adapte à l'entraînement en endurance en se dilatant, de manière à contribuer à l'augmentation du volume de sang qui circule vers les muscles sollicités par l'exercice, et ce sans en augmenter la vitesse.

Miyachi et al. posent donc les bases d'une réflexion à propos de l'adaptation de l'aorte à la pratique d'un sport d'endurance, ouvrant la porte à l'existence d'un possible remodelage non pas cardiaque mais vasculaire cette fois-ci. Au vu des observations faites dans le cadre du remodelage cardiaque, il est donc légitime de se poser la question suivante : si remodelage vasculaire il y a, jusque dans quelles mesures peut-on le considérer comme physiologique ? A l'image du « cœur d'athlète » peut-on possiblement évoquer l'existence d'une « artère d'athlète » ?

En 1989, Roman et al. s'intéressent à l'étude en échographie des dimensions de la racine aortique chez 52 enfants et 135 adultes en bonne santé (90). Les mesures ont été réalisées au niveau du sinus de Valsalva en échographie deux dimensions. Cependant, les mesures réalisées en mode M donnaient des résultats inférieurs. Les auteurs ont permis de montrer que les dimensions de la racine aortique étaient influencées par l'âge et par la surface corporelle mais pas par la pression artérielle. Ils recommandent également d'utiliser une mesure réalisée en mode M et normalisée par la surface corporelle, uniquement chez les enfants, pour ne pas diagnostiquer à tort de dilatation aortique. Chez les adultes, ils suggèrent de normaliser ces valeurs par la taille, de manière à sensibiliser au maximum le *cut-off* pour parler de dilatation aortique. Enfin, ils proposent dans cette étude, avec une spécificité de 98 %, la valeur seuil de 2,1 cm/m² au-delà de laquelle il faut parler de dilatation aortique au niveau du sinus de Valsalva, tant pour les hommes que pour les femmes.

Cette première étude peut être complétée par les travaux de Vríz et al. parus en 2014, pour lesquels les auteurs ont recruté pas moins de 1043 sujets caucasiens en bonne santé, hommes et femmes

(91). Les mesures ont été réalisées en échographie transthoracique deux dimensions. Les résultats montrent une corrélation des dimensions aortiques avec l'âge et le genre, voire la surface corporelle en fonction du modèle de régression multiple choisi. Un tableau récapitulatif (**tableau 1-3**) est présenté ci-dessous.

Tableau 1-3. Diamètres aortiques indexés sur la surface corporelle, et stratifiés selon l'âge et le genre, d'après Vríz et al, 2014 (91)

Age (yrs)	Annulus			Sinuses of Valsalva		
	Men	Women	p	Men	Women	p
16–29 (M 117/F 97)	10.8 ± 1.3 (8.0–14.8)	11.1 ± 1.2 (8.5–14.9)	0.6	15.2 ± 1.6 (11.0–19.0)	15.7 ± 1.7 (11.0–20.9)	0.03
30–39 (M 92/F 89)	10.5 ± 1.1 (8.6–13.5)	11.1 ± 1.2 (6.5–14.6)	0.001	15.6 ± 1.7 (11.8–19.3)	16.4 ± 1.7 (9.4–20.9)	0.003
40–49 (M 110/F 118)	10.9 ± 1.2 (8.2–14.5)	11.1 ± 1.0 (9.0–14.9)	0.2	16.6 ± 1.8 (11.2–22.4)	17.2 ± 2.0 (11.0–24.5)	0.01
50–59 (M 106/F 137)	10.9 ± 1.1 (8.3–14.3)	11.2 ± 1.1 (8.8–13.9)	0.01	17.1 ± 1.8 (13.6–22.3)	17.7 ± 1.8 (13.0–23.0)	0.012
≥60 (M 78/F 97)	11.3 ± 1.3 (8.7–14.4)	11.7 ± 1.1 (9.4–14.6)	0.07	18.5 ± 2.35 (13.9 ± 24.0)	18.4 ± 2.0 (15.0–24.3)	0.7

Age (yrs)	Sinotubular Junction			Proximal Ascending Aorta		
	Men	Women	p	Men	Women	p
16–29 (M 117/F 97)	12.6 ± 1.7 (7.8–18.1)	13.3 ± 1.7 (8.8–18.2)	0.03	13.3 ± 1.9 (8.6–18.7)	14.5 ± 1.8 (10.3–19.1)	0.001
30–39 (M 92/F 89)	13.2 ± 1.6 (9.8–19.5)	14.0 ± 1.6 (8.7–18.7)	0.001	14.0 ± 1.4 (10.9–17.5)	15.5 ± 1.7 (9.0–19.7)	0.0001
40–49 (M 110/F 118)	14.0 ± 1.8 (10.4–18.4)	14.6 ± 1.7 (10.1–19.6)	0.007	15.2 ± 1.9 (11.3–20.8)	16.5 ± 1.8 (10.8–21.6)	0.0001
50–59 (M 106/F 137)	14.8 ± 1.6 (11.4–19.4)	15.3 ± 1.8 (11.5–20.1)	0.02	16.3 ± 1.8 (12.1–21.9)	17.1 ± 1.7 (12.0–21.4)	0.001
≥60 (M 78/F 97)	15.5 ± 2.1 (10.8–20.7)	15.6 ± 1.7 (12.0–20.9)	0.7	17.3 ± 2.13 (12.5–21.7)	18.2 ± 1.8 (13.4–22.7)	0.006

Les données sont présentées sous la forme moyenne ± écart-type. Le nombre d'observations ainsi que les intervalles des valeurs sont indiqués entre parenthèses. Les *p-values* se réfèrent aux différences entre les hommes et les femmes.

BSA : surface corporelle ; F : femme ; M : homme

Une autre étude, celle de Aparci et al., s'est intéressée à ces élargissements de l'aorte ascendante dans une population de professions données, à savoir celles qui requièrent au moins 4000 kcal/j du fait d'activités de nature isométrique, lourdes et fatigantes, prolongées ou répétitives, comme celles de pompier ou de militaire (92). Les différentes mesures réalisées au niveau de la racine aortique et de l'aorte ascendante sont significativement plus élevées dans le groupe testé (respectivement 35,6 ± 3,0 mm et 33,5 ± 1,9 mm) que dans le groupe contrôle (respectivement 36,8 ± 3,0 mm et 34,4 ± 1,9 mm). De plus, il est démontré que le diamètre de la racine aortique est corrélé à la taille du sujet, et même au diamètre de son oreillette gauche. Le diamètre de l'aorte ascendante est quant à lui corrélé au type de profession, au diamètre télésystolique du ventricule gauche et au diamètre de

l'oreillette gauche selon une analyse de régression linéaire. Les auteurs en concluent donc que ces professions sont plus à risque de dilatation de l'aorte et donc d'anévrisme, et recommandent un suivi échographique adapté afin de prendre les mesures préventives nécessaires et d'éviter tout événement cardio-vasculaire fatal.

Cette dernière étude interroge donc sur l'impact vasculaire de certaines activités professionnelles et de leur enjeu médical en termes de morbidité et de mortalité. Connaissant les exigences au moins cardio-vasculaires de certains sports, d'autant plus à haut niveau de pratique à visée de performance, on ne peut donc pas ignorer l'existence d'un potentiel remodelage vasculaire délétère dans cette population particulière de sportifs de niveau élite. En effet, comment ces athlètes pourraient être épargnés par cette hypothèse alors que certains font l'objet d'un remodelage cardiaque pathologique ; et que le couplage ventriculo-artériel continue à jouer son rôle « d'adaptateur hémodynamique » en toute situation ?

D'Andrea et al. semblent être les premiers auteurs à s'être intéressés aux dimensions de la racine aortique dans la population d'athlètes élités. Ces premiers travaux sont parus en 2010 dans lesquels ils comparent 615 athlètes de niveau élite, 370 évoluant dans des sports d'endurance tandis que 245 préféraient les sports de résistance, comme les sports de force (93). Les mesures réalisées en échographie ont été faites au niveau de l'anneau aortique, du sinus de Valsalva, de la jonction sinotubulaire et au niveau de l'aorte ascendante proximale dans son diamètre le plus élevé. Les dimensions de la racine aortique étaient significativement plus élevées chez les athlètes entraînés en résistance et ce, quel que soit le niveau de mesure. Cependant, seuls six athlètes de force présentaient une dilatation de l'aorte ascendante soit 1 % de l'effectif total. Une fois de plus, en analyse multivariée et pour l'ensemble de la population étudiée, la surface corporelle, le type et la durée de l'entraînement dans le temps, ainsi que la contrainte circonférentielle télésystolique du ventricule gauche, sont les paramètres prédictifs indépendants du diamètre de la racine aortique à tous les niveaux de mesure. Les auteurs relèvent cependant qu'une dilatation significative de l'aorte ascendante reste un élément non commun qu'il faut surveiller régulièrement voire évaluer en tomographie.

Cette étude est d'ailleurs reprise par Iskandar et Thompson, dans leur méta-analyse parue en 2013 sur la taille de la racine aortique chez des athlètes de niveau élite (94). 23 études ont été retenues dont 13 ont été réalisées comparativement avec des sujets contrôles. La moyenne des dimensions de la racine aortique pondérée sur le poids est de 31,6 mm [IC95% : 30,2-33,1] au niveau du sinus de

Valsalva et de 30,8 mm [IC95% : 29,9-31,8] au niveau de l'anneau aortique chez les hommes. Le coefficient d'ajustement de la différence était de 1,6 entre les athlètes et les contrôles. Il était de 4,1 entre les hommes et les femmes, ces dernières étant prises comme références par les auteurs pour la mesure au niveau de l'anneau aortique. Ce coefficient passait respectivement à 3,2 et 4,7 pour les mesures réalisées au niveau du sinus de Valsalva. Par conséquent, les auteurs en concluent que l'entraînement des athlètes de niveau élite est associé à une petite, mais significative, augmentation du diamètre de la racine aortique, notamment au niveau du sinus de Valsalva. Cette augmentation n'est cependant pas significative sur le plan clinique. Toutefois, cette majoration des dimensions de la racine aortique chez ces athlètes ne doit pas être attribuée à des caractéristiques liées au cœur d'athlète.

Nous venons de voir que les dimensions de la racine aortique étaient majorées chez des athlètes à haut niveau d'entraînement, que ce soit chez les athlètes entraînés en endurance ou chez les athlètes entraînés en résistance, et ce sans toutefois parler de dilatation pathologique exigeant immédiatement l'arrêt du sport. Mais jusqu'à quel point ?

Pelliccia et al. se sont donc penchés sur la prévalence de la dilatation de la racine aortique chez des athlètes hautement entraînés pratiquant la compétition (95). Un peu plus de 2300 athlètes dont 28 % participaient Jeux Olympiques et évoluant dans 28 sports différents, ont été recrutés. Le *cut-off* du 99^e percentile a été choisi arbitrairement pour définir la valeur seuil, au-delà de laquelle était définie la dilatation pathologique de l'aorte. Ce *cut-off* était de 40 et 34 mm respectivement chez les hommes et chez les femmes. Les valeurs moyennes de la racine aortique étaient quant à elles de $32,2 \pm 2,7$ mm chez les hommes et de $27,5 \pm 2,6$ mm chez les femmes. Les analyses en régression multiple ont montré que les dimensions de la racine aortique étaient corrélées au sexe, à l'âge, à la taille et au poids de l'individu, ainsi qu'à la masse du ventricule gauche, soit une influence de plus de 60 % au total sur la variabilité de la taille de l'aorte. De même, certains sports se sont avérés avoir un impact significatif sur les dimensions de ce vaisseau central, comme le cyclisme, la natation, le water-polo ou encore le basket-ball. Les auteurs ont pu observer que les dimensions de l'aorte étaient plus importantes chez les athlètes d'endurance que chez les athlètes de force, ainsi que chez les individus de sexe masculin ($33,2 \pm 2,2$ mm versus $31,7 \pm 2,2$ mm ; $p < 0,01$). De plus, les dimensions de la cavité du ventricule gauche, son épaisseur ainsi que sa masse, étaient les plus élevées chez les athlètes d'endurance. Pelliccia et al. confirment donc qu'une dilatation de l'aorte ascendante au-delà de 40 mm est une particularité non commune chez les athlètes hautement entraînés et ne doit pas être considérée comme une expression du remodelage cardio-vasculaire

physiologique dans le contexte d'un cœur d'athlète. Les auteurs rappellent que cette étude a été réalisée chez des athlètes d'origine italienne et que les résultats ne peuvent pas être élargis à l'ensemble des populations athlétiques sans prendre en considération leur origine ethnique. Ils suggèrent toutefois de poursuivre une surveillance clinique rapprochée ainsi qu'un contrôle par échographie de manière régulière chez ces athlètes. Cette suggestion a d'ailleurs été reprise dans les recommandations de pratique sportive de l'ESC parues en 2021, pour les personnes atteintes de pathologies cardio-vasculaires telles que les aortopathies (22).

D'Andrea et al. viennent compléter cette hypothèse que les athlètes d'endurance présentent des dimensions plus larges de la racine aortique, par le biais de cette étude comparative publiée en 2012 (96). Cette dernière s'intéresse à la rigidité et à la distensibilité artérielles chez les athlètes de haut niveau. 220 athlètes d'endurance, 190 athlètes de force et 240 personnes contrôles ont été inclus. Les mesures ont été réalisées en échocardiographie transthoracique. Les dimensions de la racine aortique ainsi que la rigidité aortique étaient significativement plus élevées chez les athlètes entraînés en force que chez les athlètes entraînés en endurance ou chez les contrôles. La distensibilité aortique était quant à elle significativement plus élevée chez les athlètes entraînés en endurance. Une dilatation aortique a été observée chez seulement quatre athlètes de force soit 2 % de l'effectif athlètes de force et 0,6 % de l'effectif total. Grâce à l'analyse multivariée et ce sur l'ensemble de la population, les paramètres âge, volume d'éjection systolique du ventricule gauche et entraînement en endurance, apparaissaient comme les seuls déterminants indépendants d'une plus haute distensibilité aortique. La contrainte circonférentielle télésystolique et l'entraînement en résistance sont quant à eux associés de façon indépendante, à la rigidité artérielle chez les athlètes entraînés en force. À noter que la durée de l'entraînement a un impact significatif dans chacune des analyses multivariées suscitées. En conclusion, les auteurs affirment que les dimensions de la racine aortique et que la rigidité artérielle sont significativement plus élevées chez les athlètes entraînés en force, alors que la distensibilité aortique est plus importante chez les athlètes d'endurance, comparativement aux contrôles avec indexation sur l'âge et le sexe.

Outre le type d'entraînement, ces derniers auteurs font apparaître une variable importante dans la notion de remodelage vasculaire, qui est la durée ou plutôt la quantité cumulée d'entraînement sur une vie. Churchill et al. ont donc souhaité étudier l'association possible d'une dilatation de l'aorte ascendante avec la pratique d'une activité d'endurance et sa répercussion à long terme (97). Les volontaires étaient des rameurs et des coureurs à pied âgés de 50 à 75 ans et qui pratiquaient leur sport depuis au moins 20 ans. 442 athlètes – 228 rameurs et 214 coureurs – ont été recrutés dont

267 hommes. La dilatation aortique a été déterminée pour une mesure au moins égale à 40 mm au niveau du sinus de Valsalva ou de l'aorte ascendante. Elle a été retrouvée chez 21 % de l'ensemble des 442 athlètes, dont 83 hommes ce qui représentait 31 % de la population masculine. 105 athlètes soit 24 % présentaient une mesure de l'aorte supérieure à deux déviations standard au-dessus de la moyenne de la population. Une fois de plus, les dimensions de l'aorte étaient corrélées de façon indépendante à l'âge, au sexe, à la taille de l'individu, au statut de compétiteur quel que soit le sport retenu, et au fait de pratiquer l'aviron. Les auteurs concluent en considérant que la dilatation aortique est commune parmi les athlètes âgés pratiquant les sports d'endurance, mettant en avant la possibilité d'un remodelage vasculaire en réponse à la pratique sportive à long terme. Encore une fois, ils recommandent un suivi longitudinal rapproché dans cette population particulière.

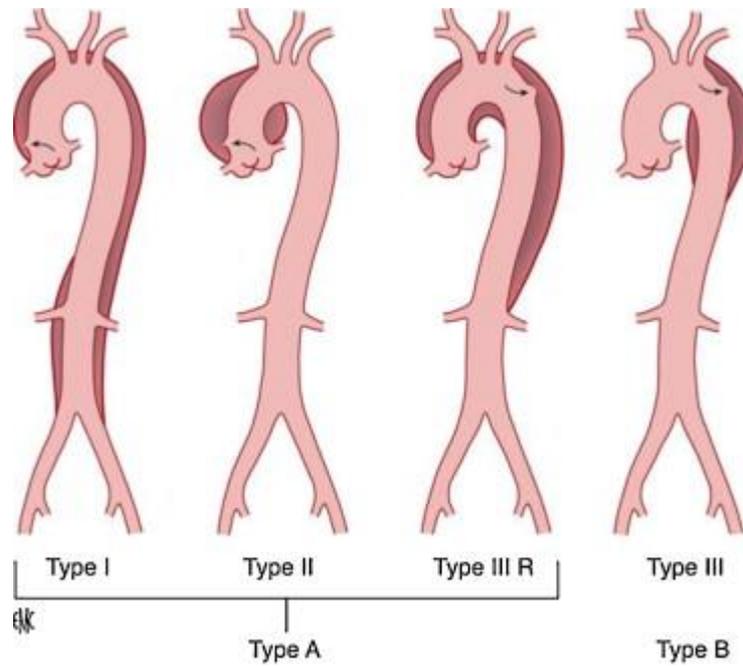
Kinoshita et al. se sont intéressés à la prévalence de la dilatation aortique chez 1929 athlètes pratiquant la compétition et âgés de 15 à 34 ans (98). 45 sports étaient représentés avec une proportion importante de basketteurs et de volleyeurs (415 athlètes soit 20 % de la population étudiée). Sept d'entre eux ont présenté une dilatation de l'aorte, pour des valeurs mesurées entre 42 et 58 mm. Deux d'entre eux ont été diagnostiqués porteurs d'un syndrome de Marfan. Sur les cinq athlètes restants, quatre pratiquaient le basket-ball. Finalement, 1817 se trouvaient dans l'intervalle de confiance à 95 % pour la mesure de la racine aortique indexée sur la surface corporelle. 59 athlètes soit 3 % présentaient des dimensions au-delà de cet intervalle. Tous étaient des hommes. Les auteurs concluent en appelant à la vigilance parmi les joueurs de basket et de volley-ball, dont certains sont très grands, faisant suspecter préférentiellement un syndrome de Marfan. Ils recommandent d'ailleurs la réalisation d'une échocardiographie y compris de façon précoce, afin de ne pas passer à côté de ce diagnostic aux conséquences parfois graves.

Une autre étude, celle de Gati et al. parue en 2019, s'intéresse une nouvelle fois à la prévalence de la dilatation de la racine aortique chez de jeunes athlètes hautement entraînés mais également à sa progression dans le temps (99). 3850 athlètes âgés de 14 à 35 ans ont été recrutés. Tous évoluaient au niveau régional ou national, et étaient engagés dans 38 sports différents, répartis selon les sous-groupes « à prédominance statique », « à prédominance endurance » et « sport mixte ». Les résultats ont été comparés avec ceux d'une population contrôle. Les athlètes s'entraînaient 16,7 heures par semaine en moyenne. 58 % étaient engagés dans des sports dits mixtes (composante statique et composante d'endurance associées), 28 % dans des sports plutôt orientés endurance et 17 % dans les sports statiques. Il existait une augmentation significative des dimensions de la racine aortique, que ce soit en valeur absolue ou sur la valeur indexée par la surface corporelle, entre les athlètes et

les contrôles. Le 99^e percentile a été arrêté pour la valeur de 38 mm chez les hommes. En se basant sur cette valeur, 58 hommes soit 2,4 % étaient donc considérés comme présentant un élargissement de la racine de l'aorte. Cinq seulement présentaient des dimensions supérieures à 40 mm (41-43 mm). Le suivi à cinq ans n'a pas révélé d'augmentation significative du diamètre de la racine aortique, que ce soit chez les hommes ou chez les femmes. Il n'y a pas eu non plus d'événement aortique majeur. Une fois de plus, les auteurs mettent en avant, d'après l'analyse multivariée, l'impact de la durée de la pratique sportive dans le temps parmi d'autres paramètres indépendants que nous avons déjà cités à plusieurs reprises. Ils affirment également que la charge hémodynamique liée à l'entraînement n'est pas apparue comme une cause responsable de la progression de la dilatation aortique dans cette cohorte. Cependant, ils recommandent la tenue de larges études longitudinales et prospectives pour évaluer avec précision la progression dans le temps d'une dilatation aortique dans les populations d'athlètes.

Toutes les équipes qui s'intéressent à la dilatation de l'aorte ascendante dans un contexte sportif s'inquiètent de l'évolution dans le temps de cette anomalie. En effet, celle-ci peut aller jusqu'à un authentique anévrisme de l'aorte ascendante dont la rupture avant sa prise en charge chirurgicale serait fatale pour l'individu. Il apparaît donc incontournable de savoir diagnostiquer les états pré-pathologiques et de « manager » leur suivi, quitte à parfois obliger une diminution du volume d'entraînement voire la réorientation d'un sportif vers un autre sport pour limiter les risques de morbidité. Dans cet article de Mayerick et al. paru en 2010, les auteurs sont particulièrement vigilants quant aux pics de pression artérielle que peuvent générer certains sports (100). En effet, au cours des entraînements en force tels que l'haltérophilie, les chiffres de tension artérielle peuvent monter jusqu'à 300 mmHg, ce qui représente un danger pour les individus qui seraient porteurs d'un anévrisme aortique méconnu. En effet, les propriétés mécaniques de la paroi aortique au niveau de cet anévrisme sont nettement détériorées, fragilisant d'autant plus cette paroi. La conjonction parfaite des forces en présence conduirait donc inévitablement à la rupture. Dans leur analyse, les auteurs ont mis en évidence un lien de cause à effet entre un effort maximal, un stress émotionnel intense et une dissection aortique aiguë de type A (**figure 1-22**). Dans ces conditions, il est donc rappelé la nécessité et surtout l'utilité de participer pour ces sportifs, aux programmes de dépistage et de prévention des pathologies cardio-vasculaires qui leur sont proposés, en réalisant régulièrement – au moins – électrocardiogramme et échocardiographie, sans oublier une mesure de la pression artérielle.

Figure 1-22. Classification des anévrismes aortiques selon De Bakey et Stanford, d'après Jacques et al., 2012 (101)



De plus, les auteurs prennent position de la façon suivante : au vu des nombreux bénéfices de l'entraînement en résistance, celui-ci peut être encouragé chez les personnes indemnes d'anévrisme aortique chez qui les pressions artérielles ne peuvent pas se révéler dangereuses, y compris à un haut niveau d'effort. Cependant, chez des individus présentant une dilatation connue de l'aorte, il est donc recommandé d'adapter le programme d'entraînement en limitant à 50 % du poids du corps la charge de travail, ou en limitant la perception de l'effort à ce niveau pour tout autre exercice en résistance.

Pour résumer cette première partie

Au cours d'un premier paragraphe, nous avons abordé les bénéfices que procure la pratique d'une activité physique régulière sur le système cardio-vasculaire, et plus particulièrement les sports d'endurance comme la natation ou le cyclisme. C'est pourquoi nous nous sommes intéressés à un sport d'endurance en pleine expansion qui combine les deux disciplines suscitées avec une troisième – la course à pied, à savoir le triathlon. Toutefois, nous avons pu constater que les triathlètes sont des sportifs d'excellence qui doivent s'entraîner davantage pour accomplir les mêmes performances, ou presque, que leurs collègues spécialistes d'une seule discipline.

Dans un second paragraphe, nous nous sommes intéressés à l'impact que pouvaient avoir les différents sports sur les paramètres – cardiaques, musculaires, fonctionnels – à l'effort. Nous en avons conclu que tous les sports ne produisaient pas les mêmes effets et qu'il était important de pouvoir les classer. Cette classification prend tout son sens lorsqu'on s'intéresse plus particulièrement dans notre cas, aux modifications cardio-vasculaires que génère un type de sport donné – sport d'endurance par exemple – lors d'une pratique suffisante, régulière et prolongée dans le temps, modifications qu'on peut regrouper sous le terme de cœur d'athlète.

Dans un troisième paragraphe, nous nous sommes focalisés sur la caractérisation de ce cœur d'athlète, et plus particulièrement sur ce qu'on appelle le remodelage cardiaque. Nous avons pu constater que les travaux récents ont pu mettre en évidence un troisième morphotype, le remodelage mixte, en plus des deux remodelages « ancestraux » qui sont le concentrique chez les athlètes de force et l'excentrique chez les coureurs à pied par exemple. On retrouve ce troisième type de remodelage chez les cyclistes ou encore chez les triathlètes. Toutefois, ce remodelage pose un problème de dualité constante, à savoir dans quelles mesures se trouve-t-on dans un cas de remodelage physiologique lié à la pratique sportive, ou bien alors est-on en face d'un véritable cas de remodelage pathologique ? La cardiomyopathie hypertrophique est probablement la « meilleure » illustration de cette ambivalence. Le sport, dont on prône sans cesse les effets bénéfiques, apparaît cette fois-ci comme un pourvoyeur de pathologie cardiaque lorsqu'un trop haut niveau de pratique est atteint. En parallèle, l'IRM cardio-vasculaire semble une modalité d'imagerie intéressante pour explorer les situations cliniques ambiguës.

Dans un quatrième et dernier paragraphe, nous ouvrons la porte à l'existence d'un possible remodelage vasculaire associé chez ces sportifs d'endurance. Basée sur le concept de couplage ventriculo-artériel, cette hypothèse anime un contingent de chercheurs en cardiologie du sport depuis une douzaine d'années maintenant dont les conclusions sont en faveur de modifications vasculaires marquées, liées elles aussi à la pratique – parfois hors-norme – des sports d'endurance.

L'enjeu de ce travail repose donc sur la caractérisation de ces remodelages cardiaque et vasculaire qui dépassent les limites normales du cadre physiologiquement acceptable, y compris chez un sportif, et ce en lien avec la charge d'entraînement mesurée ou ne serait-ce qu'évaluée, au cours de la vie entière d'un athlète.

Partie 2 : Matériel & Méthodes

I. Contexte de nos recherches

Dans le cadre de notre Master 2 BioSciences Ingénierie Santé soutenu en septembre 2014, nous avons réalisé un stage en laboratoire afin de découvrir les aspects de la recherche clinique de terrain. Déjà rattachés au laboratoire IADI – Imagerie Adaptative Diagnostique Interventionnelle – dirigé par le Professeur Jacques FELBLINGER, nous avons donc réfléchi avec notre encadrant et directeur de mémoire, le Professeur Damien MANDRY, à notre volonté de trouver un sujet qui allierait utilisation de l'IRM cardiovasculaire et étude dans le domaine du sport. Nous avons donc décidé de nous intéresser à l'étude de la compliance artérielle dans une population de sportifs d'endurance comparée à celle d'individus pouvant être considérés comme sédentaire.

Pour cela, nous avons recruté 12 triathlètes lorrains qui préparaient une épreuve longue distance dans l'année en cours ainsi que 12 hommes insuffisamment actifs. Nous avons choisi une population masculine car nous disposions de davantage de données bibliographiques à ce sujet. De plus, nous avons restreint notre recrutement à des sportifs pratiquant le longue distance car les volumes d'entraînement pour ce type d'épreuve sont suffisamment importants pour induire un remodelage au moins cardiaque objectivable en imagerie (102). En parallèle, la population contrôle devait être appariée sur l'âge de manière à limiter l'impact de ce facteur de risque cardiovasculaire connu pour modifier la rigidité artérielle au cours du vieillissement (87). De plus, ces personnes devaient être insuffisamment actives, c'est-à-dire ne pas pratiquer d'activité physique régulière et suffisante selon les recommandations de l'OMS. En effet, nous savions déjà à cette période que le sport d'endurance modifiait la compliance artérielle. C'est pourquoi, nous avons besoin d'une population non sportive et peu active pour effectuer nos comparaisons et évaluer l'impact du sport, ici du triathlon, sur les adaptations cardiaques et vasculaires. Cette première étude a été réalisée dans le cadre du protocole de recherche clinique METHODO promu par le CHRU de Nancy, numéro NCT02887053, qui vise à développer les acquisitions en IRM chez le sujet sain.

Notre protocole de recherche avait consisté en la réalisation de différentes acquisitions à l'aide d'une IRM 3T. Les séquences avaient permis notamment de mesurer les paramètres ventriculaires usuels (volumes télésystoliques gauche et droit, volumes télédiastoliques gauche et droit, volumes d'éjection systolique gauche et droit, fractions d'éjection gauche et droite, masse du ventricule gauche), les sections aortiques en systole et en diastole à différents niveaux sur le trajet de l'aorte (aorte thoracique ascendante, aorte thoracique descendante, aorte abdominale), ainsi que de procéder aux mesures pour calculer la vitesse de l'onde de pouls aortique. Tous les volontaires avaient réalisé les mêmes séquences. Toutefois, les triathlètes s'étaient soumis à une première acquisition au mois de janvier 2014 et une seconde deux mois après, après augmentation de leur volume d'entraînement. De cette manière, il existait une différence significative d'environ trois heures en moyenne entre ces deux visites. La première correspondait à une phase d'entraînement de fond hivernal tandis que la seconde marquait la reprise d'un entraînement un peu plus engagé en vue des compétitions à venir.

Il y a sept ans, nous avons pu mettre en évidence que les triathlètes présentaient un remodelage cardiaque de type mixte, c'est-à-dire un épaississement des parois ventriculaires gauches associé à un élargissement du volume interne de ce même ventricule, cohérent avec la pratique du triathlon (36). Ce remodelage est resté stable entre les deux temps d'acquisition. Sur le plan vasculaire, nous avons été étonnés de trouver l'absence de différence significative en termes de compliance aortique et de distensibilité entre les triathlètes et leurs contrôles appariés lors de la première acquisition. Cependant, nous avons observé de façon significative une diminution de la compliance et une augmentation de la distensibilité aortiques au cours de la deuxième visite. Nous avons donc attribué ces différences aux variations de la charge d'entraînement au cours des deux mois passés.

Au vu de ces résultats intéressants et significatifs dans une période où le concept d'artère commençait à émerger (103), nous avons décidé de soumettre nos travaux à publication. Ces derniers ont été publiés dans *Journal of Science and Medicine in Sport* en date du 29 octobre 2016 (1), revue de rang A avec un impact factor de 3,607 en 2019.

Cette étude pilote nous a donc permis de valider notre outil IRM mais nous a laissé interrogatifs quant à l'impact d'une pratique sportive assidue comme le triathlon longue distance, sur le remodelage vasculaire au cours d'une saison sportive mais aussi au cours d'une vie tout entière de sportif. Ces interrogations ont donc ouvert la voie à un nouveau projet de recherche dans le cadre de nos travaux de thèse de sciences.

Dans ce nouveau volet d'étude, nous avons souhaité approfondir nos recherches et nos connaissances en matière de physiologie cardiovasculaire adaptative à l'effort lors de la pratique de sports d'endurance comme le triathlon. L'étude COATRI – pour COmpliance Artérielle chez le TRIathlète – s'est donc articulée autour de trois grands objectifs de recherche :

- étudier la cinétique des paramètres vasculaires voire cardiaques chez des sportifs amateurs pratiquant le triathlon longue distance, au cours de la saison sportive 2018 ;
- valider d'un point de vue méthodologique les mesures des paramètres cardiaques et vasculaires effectuées en CMR ;
- proposer une analyse de l'entraînement de ces triathlètes longue distance amateurs.

Afin d'étudier cette variabilité annuelle, les triathlètes devaient réaliser trois visites : une avant la phase d'intensification de l'entraînement en fin de période hivernale, une au pic de forme soit deux à trois semaines avant l'objectif principal de la saison de compétition, et enfin la troisième en fin de saison sportive donc avant la reprise du travail de fond hivernal. Encore une fois, pour assurer la significativité de nos comparaisons, la population de triathlètes a été appariée à une population insuffisamment active considérée comme témoin, appariée sur le sexe et l'âge.

Le protocole de recherche COATRI a fait l'objet d'une promotion par le CHRU de Nancy et a reçu un avis favorable du Comité de Protection des Personnes (CPP) Ouest II – Angers en date du 17 novembre 2017, numéro d'approbation 2017/55. Son identifiant ID-RCB est le 2017-A01872-51. Ce protocole a également été déclaré sur ClinicalTrials.gov sous le numéro NCT03356301.

Cette étude a été acceptée au deuxième rang sur liste complémentaire dans le cadre de l'appel à projets pour le Contrat de Programme de Recherche Clinique (CPRC) 2017 du CHRU de Nancy. Notre protocole a finalement été retenu sur liste principale au titre de l'Appel à Projets Jeunes Chercheurs du Groupement Interrégional de Recherche Clinique et d'Innovation de l'Est (GIRCI Est) pour l'année 2017. Ce groupement a assuré une partie du financement de ce projet. La partie restante a été prise en charge par le CHRU de Nancy (CIC-IT) ainsi que par l'unité de recherche MARCAGE sur fonds propres.

II. Population étudiée

A. Modalités de recrutement

Initialement, nous avons prévu de recruter le groupe triathlètes par voie de presse ainsi que par voie d’affichage et information via la Ligue Lorraine de triathlon (**annexe n°1**), pour laquelle nous étions élus à son Comité Directeur mais également médecin fédéral régional. Devant l’absence de manifestation spontanée de la part des triathlètes potentiellement candidats, nous avons décidé de les solliciter personnellement via l’utilisation des réseaux sociaux. Pour cela, nous avons procédé de la façon suivante :

- nous avons récupéré les résultats des triathlons lorrains qui se sont déroulés en 2017 et qui proposaient une épreuve au format M ;
- nous avons arrêté la consultation des résultats lorsque le temps d’arrivée était supérieur à 2h45 ;
- parmi les *finishers*, nous avons retiré les femmes puis les hommes qui ne rentraient pas dans la catégorie Senior, c’est-à-dire les Masters (âge > 40 ans) et les jeunes (âge < 19 ans). Nous avons également exclu les athlètes non licenciés en Lorraine ainsi que les sportifs non licenciés à la Fédération Française de Triathlon ;
- nous avons relevé le nom des athlètes concernés et les avons démarchés en leur adressant quelques informations (critères d’inclusion principaux et déroulé de la recherche : trois visites à Nancy avec réalisation d’une IRM à chaque fois) et en les invitant à nous recontacter par téléphone pour en savoir davantage.

Ce travail a représenté l’obtention d’une bonne centaine de candidats potentiels. Le démarchage a permis une cinquantaine de contacts téléphoniques qui ont débouché sur environ 25 recrutements effectifs. Ce nombre a été complété par le bouche-à-oreille, soit venant de notre cercle de connaissances, soit venant de volontaires déjà pré-engagés.

Concernant le groupe témoins, celui-ci a bénéficié des mêmes moyens de recrutement que le groupe triathlètes. Mais il a également fait l’objet d’un appel à volontaires par voie d’affichage au CHRU de Nancy, par les médecins investigateurs, par les collaborateurs scientifiques, mais également via le site Internet et la base de données des volontaires sains du CIC-IT de Nancy. En raison d’un manque de volontaires pour certaines fourchettes d’âges, nous avons élargi nos moyens d’information via la newsletter de l’Université de Lorraine mais également via la presse locale, grâce à la parution d’un article dans le quotidien *L’Est Républicain* paru le 13/04/18 (**annexe n°2**).

Tous les volontaires de cette étude, triathlètes et contrôles, ont été contactés par téléphone en amont de la première visite pour une présélection. Cette première prise de contact, qui durait entre 15 et 45 minutes, a consisté à expliquer les modalités de ce protocole : contexte de la recherche, acquisitions des données, modalités IRM et contre-indications, nombre de rendez-vous et contraintes temporelles (date imposée par le calendrier sportif), défraiement, critères d'inclusion et de non inclusion ...

Grâce à notre étude pilote et aux résultats préliminaires obtenus sur le critère de jugement principal, à savoir la compliance aortique, nous avons pu calculer le nombre nécessaire de volontaires à inclure dans chaque groupe soit 31,2. Compte tenu des risques de perdus de vue et de sortie précoce du protocole estimés à 10 % de l'effectif, nous en avons déduit que le nombre de volontaires à inclure était de 35 pour chaque groupe. Ajoutons à cela que témoins et triathlètes devaient également être appariés sur l'âge (+/-2 ans) selon un ratio 1:1.

B. Sélection des volontaires

Les critères d'inclusion ont été les suivants pour l'ensemble des participants de cette étude :

- Avoir un indice de masse corporel (IMC) compris entre 18,5 et 25 kg/m²,
- Etre affilié à un régime de sécurité sociale ou être bénéficiaire d'un tel régime,
- Avoir reçu l'information complète sur l'organisation de la recherche et avoir signé son consentement éclairé,
- Avoir réalisé un examen clinique préalable et adapté à la recherche.

Pour le groupe triathlètes, les volontaires devaient pratiquer le triathlon depuis au moins un an et devaient appartenir à la catégorie Senior jusqu'au 31/12/2017, c'est-à-dire pour des hommes nés entre 1997 et 1978 inclus. Les candidats retenus devaient avoir un niveau de performance minimum, c'est-à-dire avoir terminé au cours de l'année passée un triathlon de format M (1500 m de natation/40 km de vélo/10 km de course à pied) en moins de 2h45. Ce critère de sélection fait référence aux travaux de Yann LE MEUR, PhD en Sciences du Sport et ancien chercheur à l'Institut National du Sport, de l'Expertise et de la Performance (INSEP) à Paris, qui a réalisé plusieurs études sur le triathlon ces dernières années (104). De plus, nos triathlètes devaient avoir pour objectif en 2018 de prendre part à un triathlon longue distance, y compris en cross triathlon, c'est-à-dire distance L (1900 m de natation/90 km de vélo/21 km de course à pied) et au-delà, que ce soit en France ou à l'étranger. Pour cela, ils devaient avoir un volume horaire d'entraînement défini, à savoir moins de huit heures par semaine en période hivernale puis entre 10 et 15 heures par semaine au moins en pleine préparation de l'objectif.

Pour le groupe témoins, les volontaires devaient appartenir à la même catégorie d'âge que les triathlètes et devaient pouvoir être considérés comme insuffisamment actifs, c'est-à-dire pratiquer moins de 150 minutes d'une activité physique d'intensité modérée par semaine comme par exemple le footing, la marche rapide ou encore le cyclotourisme. Cette limitation s'est faite selon la définition et les recommandations en la matière de l'OMS (8).

Ensuite, concernant les modalités de non inclusion pour l'ensemble de nos volontaires, nous avons retenu les critères suivants :

- Antécédents cardiovasculaires dont troubles du rythme cardiaque connus, valvulopathies ...
- Maladie chronique pouvant modifier le remodelage cardiovasculaire et donc avoir une influence sur les mesures de la rigidité artérielle comme par exemple le diabète, l'hypertension artérielle...
- Traitements médicamenteux au long cours pouvant modifier le remodelage cardiovasculaire tels qu'Inhibiteur de l'Enzyme de Conversion, Antagoniste du Récepteur de l'Angiotensine II...
- Tabagisme actif, même occasionnel
- Contre-indication à la réalisation d'une IRM comme la claustrophobie, être porteur d'éclats métalliques potentiellement mobiles et ce quelle que soit leur localisation...

- Personnes visées aux articles L. 1121-5 à L. 1121-8 et L1122-2 du Code de la Santé Publique :
 - Femme enceinte, parturiente ou mère qui allaite
 - Personne privée de liberté par une décision judiciaire ou administrative
 - Personne faisant l'objet de soins psychiatriques en vertu des articles L.3212-1 et L.3213-1 du Code de la Santé Publique
 - Personne admise dans un établissement sanitaire ou social à d'autres fins que celles de la recherche
 - Personne mineure (non émancipée)
 - Personne majeure faisant l'objet d'une mesure de protection légale (tutelle, curatelle, sauvegarde de justice)
 - Personne majeure hors d'état d'exprimer son consentement et qui ne fait pas l'objet d'une mesure de protection juridique.

Par conséquent, nous avons pu inclure 34 individus dans le groupe triathlètes et 29 dans le groupe témoins.

III. Méthodologie de la recherche

A. Critères d'évaluation

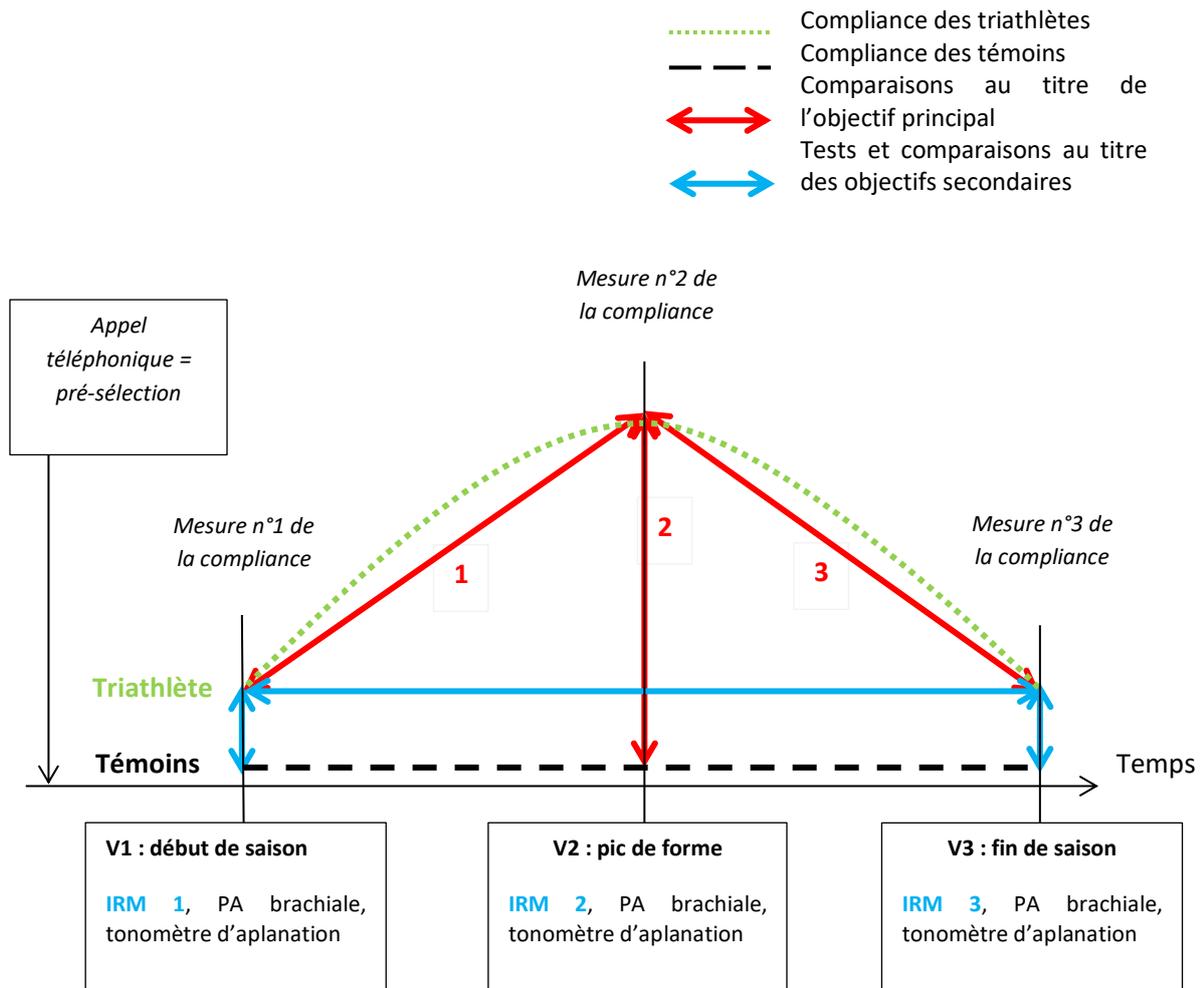
Le critère d'évaluation principal correspond à l'étude de la variation de la compliance aortique chez les triathlètes, comparativement aux contrôles, lors des trois temps de l'étude soit au cours de la saison sportive. Nous avons défini la compliance aortique mesurée en IRM comme le rapport de la différence des sections aortiques maximale et minimale, et de la pression pulsée. Cette dernière correspond à la différence entre la pression artérielle systolique et la pression artérielle diastolique (84).

Nous avons également défini des critères d'évaluation secondaires :

- Mesure et comparaison des paramètres fonctionnels cardiaques (Volume TéléSystolique, Volume TéléDiastolique, Volume d'Ejection Systolique, Fraction d'Ejection, masse du Ventricule Gauche) chez les triathlètes et les témoins au cours de la saison sportive, obtenus grâce à des séquences de ciné IRM ;
- Comparaison des mesures de distensibilité aortique réalisées en IRM à celles obtenues par tonométrie d'aplanation ;
- Comparaison des mesures des vitesses du flux sanguin, obtenues grâce à des séquences de type contraste de phase, aux niveaux ventriculaire et aortique ;
- Etude descriptive de l'entraînement des triathlètes en termes de nombre de séances, de volume horaire et de type de séances réalisé, pour les trois disciplines ;
- Analyse de l'entraînement des triathlètes selon la méthodologie des TRIMPS.

Nous proposons un schéma théorique de l'étude afin d'illustrer nos hypothèses (**figure 2-1**).

Figure 2-1. Schéma théorique de l'étude COATRI avec illustration des hypothèses envisagées



B. Déroulement de la recherche

Cette étude a été prospective, monocentrique, interventionnelle à risques et contraintes minimales, ouverte, contrôlée et appariée, entre un groupe de triathlètes et un groupe de témoins.

1. Description de la recherche

a. Pré-sélection

Tous les volontaires pour cette étude ont été contactés par téléphone pour expliquer les modalités de ce protocole et vérifier les critères d'inclusion et de non inclusion. Une fois l'accord oral donné, la date du premier rendez-vous a été définie selon les contraintes matérielles imposées par les disponibilités de l'IRM et les disponibilités des volontaires. Cette phase a débuté en juin 2017 avec les contacts téléphoniques des premiers triathlètes pour s'achever en avril 2018 avec les contacts téléphoniques pour les derniers témoins.

b. Visite d'inclusion = Visite n°1 (V1)

Pour la date de ce premier rendez-vous, la priorité a été donnée aux triathlètes compte tenu des contraintes d'entraînement, et notamment de l'augmentation progressive de la charge sportive en vue des premières compétitions de la saison en mai 2018 pour certains. Leurs inclusions ont eu lieu globalement entre le 01/12/2017 et le 15/02/2018 durant cette période de trêve hivernale et avant la reprise de l'entraînement préparatoire à l'objectif. Quant aux témoins, ils ont été inclus sur la période du 01/03/2018 au 30/04/2018.

Le volontaire s'est rendu au CHRU de Nancy pour la visite d'inclusion. Avant tout examen ou acte spécifique à la recherche, l'investigateur a informé la personne et recueilli son consentement libre et éclairé de façon écrite. Un examen clinique dédié a été réalisé par le médecin investigateur, qui a

vérifié et confirmé les critères d'inclusion et de non inclusion. Le questionnaire de vie sportive a été rempli une seule fois par le volontaire lors de cette visite et ce, avec l'aide de l'investigateur au besoin. Ce dernier a vérifié ce document. Après explication, l'agenda du sportif a été remis aux triathlètes uniquement.

Ce premier rendez-vous a consisté en la réalisation d'une IRM cardio-vasculaire à visée recherche sans injection de produit de contraste. Le volontaire a été installé en décubitus dorsal et les capteurs de synchronisation de Siemens dédiés pour l'IRM PRISMA, pour le rythme cardiaque et pour la respiration, ont été positionnés respectivement sur le thorax et au niveau abdominal. Un brassard tensionnel MAGLIFE Serenity (Schiller, Bussy St Georges, France), utilisé pour la mesure de la tension artérielle périphérique lors de l'examen IRM, a été placé sur le bras gauche du volontaire, à hauteur du cœur. L'examen comprenait des séquences en ciné-IRM pour les images ventriculaires, et des séquences en contraste de phase pour les images vasculaires. La durée totale de l'acquisition était de 60 minutes maximum, sauf incident technique. A l'issue, les données de recherche ont été consignées dans le cahier d'observation édité au format papier. En effet, vu que les investigateurs officiaient sur deux sites d'acquisition des données différents, il est apparu plus pratique d'avoir recours à une version papier de cet outil. Les images IRM ont été transférées quant à elles dans Archimède 3 Server version 3.1.26 du CIC-IT (Centre d'Investigation Clinique – Innovation Technologique).

Avant ou après la réalisation de l'IRM, le volontaire a été conduit en salle de tonométrie par ascenseur uniquement, de manière à ne pas perturber les mesures de la pression artérielle suite à la montée des dix étages à pied. Le volontaire était installé en décubitus dorsal et devait observer une période de repos minimum de cinq minutes dans ces conditions. Ensuite, trois mesures consécutives de la pression artérielle périphérique (brachiale) à deux minutes d'intervalle chacune ont été réalisées grâce à l'utilisation d'un dispositif médical automatisé OMRON®, tensiomètre à bras de type M2. Les différents paramètres vasculaires ont été déterminés de façon non-invasive par les tonomètres d'aplanation Sphygmocor® (modèle CvMS-CP, AtCor Medical), technique de référence, et PulsePen® (Diatecne SRL). Les mesures ont été réalisées par un opérateur entraîné entre l'artère carotide et l'artère fémorale, et ont consisté notamment en la détermination de la pression pulsée centrale et de la vitesse de l'onde de pouls. La durée totale de l'examen variait de 10 à 30 minutes en moyenne selon les contraintes cliniques et ce, afin d'obtenir une qualité suffisante des mesures réalisées.

c. Visite n°2 (V2)

Cette seconde visite a été conduite de façon superposable à la première, sauf que les critères d'inclusion et de non inclusion n'ont plus été recherchés et que le questionnaire de la vie sportive n'a pas été complété une nouvelle fois. Toutefois, l'observance des recommandations a été vérifiée, tout comme le remplissage correct de l'agenda du sportif pour les triathlètes qui pensaient à le rapporter, et qui utilisaient la version papier. En effet, certains ont demandé à pouvoir remplir leur agenda de façon numérique. Par conséquent, une version informatisée leur a été adressée par email.

La date de la seconde visite des triathlètes a été déterminée selon la date de leur triathlon longue distance considéré comme épreuve majeure en 2018, soit deux à trois semaines avant, ce qui correspond à la période « d'affûtage » avant un événement sportif. L'affûtage est la période durant laquelle un athlète va diminuer sa charge d'entraînement afin de réduire la fatigue qui résulte de ce dernier, pour être en forme le jour J. Pour les témoins, nous avons déterminé un tableau d'appariement (**tableau 2-1**) de manière à organiser idéalement cette seconde visite. En effet, chaque témoin devait réaliser sa seconde visite deux semaines avant ou après celle de son triathlète apparié. Nous avons procédé de la sorte pour déterminer nos couples triathlète-contrôle :

- L'appariement, ou « *match* », était considéré comme idéal si un triathlète et un contrôle partageaient la même année de naissance (couleur verte du **tableau 2-1**) ;
- Il devenait « bon *match* » s'il existait une année de différence entre les deux (couleur jaune du **tableau 2-1**) ;
- L'appariement était « acceptable » en cas d'une différence de deux ans entre deux volontaires (couleur orange du **tableau 2-1**).

Cette deuxième visite a eu lieu du 25/04/2018 au 15/10/2018.

Tableau 2-1. Tableau d'appariement sur l'année de naissance entre les volontaires du groupe triathlète et les volontaires du groupe contrôle

Triathlète	Année	Contrôle																										
		1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996								
01-0015	1978		02-0016																									
01-0019	1978	02-0024																										
01-0007	1978		02-0016																									
01-0008	1979	volontaire sorti de l'étude																										
01-0005	1979		02-0001																									
01-0003	1979			02-0005																								
01-0017	1979				02-0019																							
01-0010	1979				02-0019																							
01-0031	1980					02-0002																						
01-0016	1980					02-0025																						
01-0027	1980					02-0002																						
01-0028	1980					02-0025																						
01-0026	1981						02-0029																					
01-0009	1982						02-0009																					
01-0014	1982						02-0018																					
01-0004	1982						02-0014																					
01-0002	1983						02-0027																					
01-0011	1984							02-0026																				
01-0025	1984							02-0022																				
01-0029	1984							02-0008																				
01-0006	1985							02-0011																				
01-0033	1986								02-0012																			
01-0012	1987								02-0028																			
01-0032	1990									02-0015																		
01-0018	1990									02-0023																		
01-0024	1991										02-0007																	
01-0030	1991										02-0010																	
01-0013	1992										02-0014																	
01-0022	1993										02-0008																	
01-0021	1994											02-0003																
01-0034	1994											02-0013																
01-0001	1996												02-0006															
01-0020	1996												02-0004															
01-0023	1998																										02-0020	

d. Visite n°3 (V3)

La troisième visite a été réalisée selon les modalités de la seconde. À cela a été ajouté le recueil des événements indésirables, qui a été effectué de la signature du consentement jusqu'à la fin de la participation à cette étude, soit jusqu'à la réalisation du dernier examen de la dernière visite V3. La date a été déterminée en fonction de l'épreuve de référence des triathlètes, soit trois à six mois après. Idéalement, ils devaient observer un repos sportif total d'un à deux mois si possible. Cependant, quasiment aucun triathlète n'était disposé à « un tel sacrifice ». Par conséquent, nous nous sommes accommodés globalement d'une simple diminution du volume d'entraînement durant cette phase de récupération. Les visites ont donc été conduites du 01/09/2018 au 15/01/2019, en sachant que la priorité d'accès à l'IRM et à la tonométrie a été donnée aux triathlètes, qui attendaient de pouvoir reprendre leur travail de préparation hivernal une fois l'étude terminée.

Pour les témoins, nous avons organisé leur troisième visite deux semaines avant ou après celle de leur triathlète apparié lorsque les conditions logistiques le permettaient. Elle a finalement été réalisée entre le 01/09/2018 et le 15/03/2019.

e. Flowchart de la recherche (tableau 2-2)

Actions	Pré-sélection	Inclusion		
		Visite n°1 (J0)	Visite n°2 (M6-8)	Visite n°3 (M9-12) Sortie d'étude
Contact téléphonique (= pré-sélection) Information, présentation de la recherche et du protocole, programmation des RDV dont visite d'inclusion	R			
Vérification des critères d'inclusion et de non inclusion	R	R		
Validation des critères d'inclusion et de non inclusion		R		
Information et recueil du consentement éclairé		R		
Interrogatoire médical	R	R	R	R
Anthropométrie (poids, taille ...)		R	R	R
Examen clinique orienté cardio-vasculaire		R	R	R
Questionnaire de Vie Sportive		R		
Mesures de la Pression Artérielle		R	R	R
ECG, Tonométrie d'aplanation		R	R	R
IRM cardio-vasculaire		R	R	R
Observance des recommandations dont remplissage de l'agenda du sportif		R	R	R
Recueil des EI/EIG		R	R	R

R : action réalisée spécifiquement pour les besoins de la recherche

2. Description des règles de sortie d'étude

En ce qui concerne une éventuelle sortie d'étude avant la fin du protocole, les règles ont été définies de la manière suivante :

- Pour l'ensemble des volontaires :
 - o Retrait de consentement
 - o Introduction d'un traitement médicamenteux au long au cours pouvant modifier le remodelage artériel
 - o Tabagisme débuté, même ponctuel
- Pour les triathlètes uniquement :
 - o Charge d'entraînement non respectée durant la préparation de l'objectif, c'est-à-dire inférieure à 10h/semaine
 - o Arrêt complet de l'entraînement (= aucun des trois sports pratiqués) plus de trois semaines avant la réalisation de la seconde IRM
- Pour les témoins uniquement :
 - o Activité physique modérée hebdomadaire > 150 min

Les triathlètes étaient soumis à une période d'interdiction pour toute autre recherche correspondant à toute la période de participation soit 15 mois, tandis que les témoins étaient autorisés à prendre part à toute autre recherche ne comprenant :

- o aucune injection médicamenteuse ou de produit de contraste ;
- o aucune ingestion de médicament quel qu'il soit ;
- o aucune modification de leurs habitudes de vie, notamment de pratiquer une activité physique d'une durée hebdomadaire majorée et d'une intensité plus élevée que ce qui a été arrêté par le protocole COATRI.

Toute personne pouvait arrêter sa participation à la recherche, à n'importe quel moment et quelle qu'en soit la raison. L'investigateur pouvait également interrompre temporairement ou définitivement la participation d'une personne à la recherche pour toute raison ayant un impact sur sa sécurité ou qui servirait au mieux les intérêts de la personne se prêtant à la recherche. En cas d'arrêt prématuré ou dans le cas où la personne se prêtant à la recherche retirait son consentement, ce retrait n'a pas eu d'incidence sur les activités menées ni sur l'utilisation des données obtenues sur la base du consentement éclairé, exprimé avant que celui-ci n'ait été retiré, sauf si la personne indiquait par écrit qu'elle s'opposait à leur utilisation. Ces sorties d'étude étaient toujours définitives.

Concernant les personnes perdues de vue, c'est-à-dire n'ayant donné aucune nouvelle, l'investigateur devait mettre tout en œuvre pour reprendre contact avec elles (et le tracer dans le dossier source), afin de savoir au moins si la personne était vivante ou décédée. De plus, l'investigateur devait faire son maximum pour que l'ensemble des visites soit réalisé en intégralité ou au moins en partie, selon les souhaits de chaque volontaire.

IV. Caractéristiques des différents outils

A. Questionnaires utilisés

1. Questionnaire de vie sportive

a. Présentation du document

Le questionnaire de vie sportive a été rédigé de manière à obtenir le plus d'informations quant au passé sportif du volontaire. En effet, nous avons estimé que ces données, notamment l'ancienneté de la pratique sportive et le volume d'entraînement cumulé au cours d'une vie, pourraient avoir un impact sur le remodelage cardiaque. Tous les volontaires ont eu à remplir ce questionnaire au moment de l'inclusion dans notre protocole.

La première partie intitulée « Identité » était dédiée aux données anthropométriques du sujet (**figure 2-2**). À ces informations étaient ajoutés la population d'étude mais également le métier pratiqué. En effet, prenons l'exemple d'un pompier et d'un comptable. Le pompier a l'obligation d'effectuer des heures d'entraînement sportif durant ses gardes à la caserne, tandis que le comptable ne pourra s'entraîner que sur ses heures de loisir. Nous voulions donc prendre en considération cet aspect, qui n'est donc pas négligeable au moins sur le remodelage cardiaque, pour des professions physiques dont font partie également les militaires de terrain. Nous avons utilisé les nomenclatures des professions et catégories socioprofessionnelles de l'Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques (INSEE) pour réaliser notre classification (105).

Figure 2-2. Extrait du questionnaire de vie sportive – partie consacrée à l'identité du volontaire (données personnelles)

➤ Identité		
NOM (trois premières lettres) : _____	PRENOM (trois premières lettres) : _____	
DATE DE NAISSANCE : ___ / ___ / 19___	AGE à l'inclusion : _____ ans	
POIDS : _____ kg	TAILLE : _____ cm	IMC : _____ kg/m ²
POPULATION d'ETUDE :	<input type="checkbox"/> Triathlète	<input type="checkbox"/> Témoin
METIER : _____		
↳ Avez-vous un entraînement sportif dans le cadre de votre activité professionnelle (exemples : pompier, militaire ...)? <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non		
↳ SI OUI , à raison de quel volume horaire hebdomadaire ? _____		

La seconde partie de ce questionnaire était consacrée, à proprement parler, à la « vie sportive » des volontaires et était organisée en trois sous-parties. La première s’adressait à tous les volontaires et a consisté à relever l’ensemble des activités sportives hors triathlon pratiquées durant l’enfance et l’adolescence (**figure 2-3a**), c’est-à-dire jusqu’à l’âge de 18 ans ...

Figure 2-3a. Extrait du questionnaire de vie sportive – partie consacrée à la vie sportive du volontaire durant l’enfance et l’adolescence (données personnelles)

➤ **Vie sportive**

❖ **Pour TOUS LES VOLONTAIRES**

- Avez-vous pratiqué une/des **activité(s) sportive(s) HORS TRIATHLON** durant votre **enfance/adolescence** (jusqu’à l’âge de 18 ans) ? Oui Non

↳ **Si OUI, décrivez-la/les** dans le tableau ci-dessous :

Note : si la pratique au sein d’un même sport a varié de façon significative d’une période à une autre (intensification de l’entraînement, début de la compétition ...), merci d’utiliser une seconde ligne.

Sport pratiqué	Âge de début	Durée de la pratique en années	Nombre d’heures d’entraînement par semaine	Compétition		
				OUI	NON	Si OUI, nombre par an

... puis à l’âge adulte, c’est-à-dire de 18 ans à l’heure actuelle (**figure 2-3b**). En effet, dans la littérature, certains auteurs font état de l’impact de l’âge du début de pratique sportive sur le remodelage cardiaque (7), tout comme le fait de pratiquer une activité physique régulière dès l’enfance (106). On y retrouve également la nature du sport pratiqué, le nombre d’heures d’entraînement hebdomadaire ainsi que la durée de pratique en années. La compétition a également un rôle à jouer.

Figure 2-3b. Extrait du questionnaire de vie sportive – partie consacrée à la vie sportive du volontaire durant l’âge adulte (données personnelles)

▪ Avez-vous pratiqué une/des **activité(s) sportive(s) HORS TRIATHLON** depuis vos **18 ans jusqu’à maintenant** ? Oui Non

↳ **Si OUI, décrivez-la/les** dans le tableau ci-dessous :

Note : si la pratique au sein d’un même sport a varié de façon significative d’une période à une autre (intensification de l’entraînement, début de la compétition ...), merci d’utiliser une seconde ligne.

Sport pratiqué	Âge de début	Durée de la pratique en années	Nombre d’heures d’entraînement par semaine	Compétition		
				OUI	NON	Si OUI, nombre par an

Dans une seconde sous-partie, nous nous sommes intéressés aux témoins uniquement en leur demandant à quel âge ils avaient arrêté de pratiquer une activité physique régulière et pour quelle(s) raison(s).

Dans une troisième et dernière sous-partie destinée aux triathlètes, nous nous sommes intéressés à leur pratique du triathlon (**figure 2-4**). Outre quelques informations concernant leurs performances passées, nous avons souhaité obtenir des données globales d’entraînement, à savoir le volume d’entraînement hebdomadaire, la durée en années de la pratique à ce volume d’entraînement ou encore l’âge de début de la pratique correspondant à un volume d’entraînement donné. Bien entendu, il était également demandé d’indiquer si la compétition était un objectif et avec quel volume annuel.

Figure 2-4. Extrait du questionnaire de vie sportive – partie consacrée à la pratique du triathlon chez les triathlètes uniquement (données personnelles)

❖ Pour LES TRIATHLETES uniquement

➤ Êtes-vous licencié de la FFTRI ? Oui Non Si Oui, depuis **quelle année** ? _____

➤ Quelle est votre **meilleure performance depuis vos débuts** ? (année / lieu / distance / temps ± rang)

➤ Quelle est votre **meilleure performance sur M en 2017** ? (lieu / date / temps ± rang)

➤ Quelle est votre **meilleure performance toutes distances en 2017** ? (lieu / date / temps ± rang)

➤ A quel **âge** avez-vous **commencé le triathlon** ? _____ et la **compétition** ? _____

➤ Décrivez dans le tableau ci-dessous **l'évolution de votre pratique du triathlon, de vos débuts à aujourd'hui** :

Âge + année de début	Durée de la pratique en années	Nombre d'heures d'entraînement par semaine	Objectif éventuel (« finir un M », temps ...)	Compétitions		
				OUI	NON	Si OUI, nombre par an (triathlon + autre)

b. Exploitation du document

Les différentes données ont été saisies dans un tableur Excel pour exploitation. Afin de déterminer notamment le volume d'entraînement à l'année, exprimé en heures par an, nous avons choisi de multiplier ce volume hebdomadaire par un nombre de 40 semaines pour la pratique dans l'enfance et l'adolescence. Etant donné que la plupart des enfants s'entraînent en club, nous avons volontairement exclu les grandes vacances de nos estimations, période au cours de laquelle les associations sportives ferment généralement leurs portes. Pour les adultes et les triathlètes, nous

avons choisi de multiplier ce volume hebdomadaire par un nombre de 45 semaines correspondant aux éventuels congés et autres périodes creuses. Dans nos estimations, nous n'avons pas pris en considération les possibles stages au cours desquels la charge d'entraînement est nettement augmentée. En effet, ces stages sont de contenu variable, difficilement estimable, et ne sont pas toujours systématiques. Enfin, pour obtenir une estimation de ce volume d'entraînement sur une vie, nous avons additionné chaque période – enfance/adolescence et âge adulte – de pratique sportive.

Une autre donnée importante dans le sport, outre le volume d'entraînement, est l'intensité de la pratique. En effet, nous avons constaté que le remodelage cardiovasculaire pouvait différer entre deux activités physiques dites douces, comme le yoga et la marche par exemple, selon leur sollicitation énergétique (107). Cette observation est également valable pour un même sport pratiqué à deux allures différentes, comme ça peut être le cas en course à pied. Pour que nos estimations soient les plus justes possible et les plus harmonisées, nous nous en sommes remis à l'exploitation du Compendium des Activités Physiques (108,109). Ce document est la référence internationale en matière d'information quant au coût énergétique en unité métabolique par heure notée MET/h. Ce dernier est indiqué pour les activités sportives pratiquées à différents niveaux d'intensité comme la natation, le cyclisme ... mais également pour les activités physiques de la vie quotidienne, comme faire son ménage ou promener le chien. Un extrait est présenté ci-dessous (figure 2-5).

Figure 2-5. Extrait du compendium des activités physiques, d'après Ainsworth et al., 1993 et 2000 (108,109)

APPENDIX 1. Compendium of Physical Activities.							
01009	8.5	Bicycling,	Bicycling, BMX or mountain	02012	5.5	Conditioning exercise,	Bicycling, stationary, 100 W, light effort
01010	4.0	Bicycling,	Bicycling, <10 mph, general, leisure, to work or for pleasure (T115)	02013	7.0	Conditioning exercise,	Bicycling, stationary, 150 W, moderate effort
01020	6.0	Bicycling,	Bicycling, 10–11.9 mph, leisure, slow, light effort	02014	10.5	Conditioning exercise,	Bicycling, stationary, 200 W, vigorous effort
01030	8.0	Bicycling,	Bicycling, 12–13.9 mph, leisure, moderate effort	02015	12.5	Conditioning exercise,	Bicycling, stationary, 250 W, very vigorous effort
01040	10.0	Bicycling,	Bicycling, 14–15.9 mph, racing or leisure, fast, vigorous effort	02020	8.0	Conditioning exercise,	Calisthenics (e.g., pushups, pullups, situps), heavy, vigorous effort
01050	12.0	Bicycling,	Bicycling, 16–19 mph, racing/not drafting or >19 mph drafting, very fast, racing general	02030	4.5	Conditioning exercise,	Calisthenics, home exercise, light or moderate effort, general (T 150) (example: back exercises), going up & down from floor
01060	16.0	Bicycling,	Bicycling, >20 mph, racing, not drafting	02040	8.0	Conditioning exercise,	Circuit training, general
01070	5.0	Bicycling,	Unicycling	02050	6.0	Conditioning exercise,	Weight lifting (free weight, nautilus or universal-type), power lifting or body building, vigorous effort (T 210)
02010	5.0	Conditioning exercise,	Bicycling, stationary, general				
02011	3.0	Conditioning exercise,	Bicycling, stationary, 50 W, very light effort				

Pour estimer le coût énergétique généré par la pratique sportive de manière hebdomadaire, il nous suffit de multiplier le volume d'entraînement par semaine, par le coût énergétique d'une heure de pratique de ce sport. Nous obtenons ainsi un coût énergétique hebdomadaire exprimé en MET/sem, et qui peut être étendu à son estimation annuelle. De ce fait, l'interprétation des données brutes comme évoquée nous permet de normaliser la pratique sportive d'un individu à un autre, en prenant en considération tant son volume d'entraînement hebdomadaire que l'intensité du sport pratiqué. De cette manière, nous pourrions donc au besoin classer les volontaires selon ce paramètre et effectuer différentes comparaisons de manière homogène.

2. Agenda du sportif

a. Présentation du document

L'agenda du sportif a été remis exclusivement aux triathlètes, dans sa forme papier ou numérique. Ce document avait pour but d'avoir une estimation concrète de l'entraînement de chaque individu à chaque période de l'année. Pour que cette demande ne soit pas trop fastidieuse aux yeux des volontaires et que le remplissage de cet agenda en devienne incomplet, nous avons demandé que soit consignée chaque mois la semaine la plus représentative de l'entraînement effectué. Une page d'aide au remplissage était fournie avec chaque agenda, dont une page est illustrée ci-dessous (**figure 2-6**). Seules les zones blanches étaient à remplir par le triathlète.

Figure 2-6. Exemple de page non remplie de l'agenda du sportif (données personnelles)

Agenda du sportif : mois de _____					
Date	Type d'activité (natation, vélo ...)	Description <u>rapide</u> de la séance	Durée globale de la séance (en min)	Score RPE pour la séance globale (cf annexe)	Charge = durée * RPE
Lundi					
Mardi					
Mercredi					
Jeudi					
Vendredi					
Samedi					
Dimanche					
Notes complémentaires :		Charge totale hebdomadaire			
		Monotonie			
		Qualification de l'effort (strain = charge*monotonie)			

Pour chaque semaine d'entraînement et donc pour chaque jour, il était demandé d'indiquer le type de sport réalisé (natation, vélo, VTT, musculation...) et la durée de la séance en minutes. Les athlètes devaient également renseigner le type de séance réalisé parmi :

- Endurance : séance réalisée à intensité légère à modérée, visant à développer les capacités d'endurance de l'individu et de résistance à la fatigue. Ses séances peuvent parfois durer plusieurs heures.
- Seuil : séance visant à développer l'allure de course et la résistance de l'individu à la fatigue y compris métabolique. Généralement, ce sont des séances d'intensité élevée proche du seuil anaérobie (seuil ventilatoire de type 2).
- Fractionné : séance de haute intensité au cours de laquelle l'athlète va alterner entre des phases de récupération à basse intensité et des phases à haute intensité. Par exemple, il va enchaîner 10 répétitions au cours desquelles il va courir très vite pendant 15 secondes puis trotter pendant 45 secondes pour récupérer. Ce type de séance est destiné à développer le deuxième seuil ventilatoire et donc à repousser la limite entre effort tolérable sur le plan métabolique et fatigue.

- PMA-VMA : séance de très haute intensité visant à développer la puissance maximale de l'individu (PMA) sur son vélo, ou sa vitesse maximale (VMA) en natation ou en course à pied. Pour cela, l'athlète va répéter des séries courtes au maximum de ses possibilités.
- Récupération : séance de très basse intensité pour aider l'individu à récupérer de l'entraînement ou d'une compétition. On parle ici de récupération active.
- Technique : séance destinée à travailler la technique du geste sportif, que ce soit la technique de nage ou de respiration en natation, de pédalage ou de conduite du vélo, ou encore la foulée en course à pied. Généralement, ces séances sont réalisées à basse intensité.

Nos triathlètes devaient également renseigner la pénibilité ressentie de l'effort, estimée par le *Rating of Perceived Exertion* (RPE), autrement dit l'échelle de qualification de l'effort perçu. Cet outil a d'ailleurs été validé par Foster et al., auteurs qui publient notamment sur la quantification de la charge d'entraînement chez l'athlète (110), et est d'utilisation internationale. Toutefois, son estimation est subjective et individuelle, et est donc non transposable d'un individu à un autre. Néanmoins, pour guider nos triathlètes, cette échelle était fournie au dos de l'agenda du sportif (**figure 2-7**). Cette estimation de l'effort perçu est intéressante car elle prend en compte tant la pénibilité attendue « sur le papier » de la séance accomplie, que la pénibilité ressentie par l'athlète. On parle alors respectivement de charge externe et de charge interne. La charge interne ne peut pas être estimée de manière quantitative contrairement à la charge externe, dans la mesure où elle reflète la disponibilité psychologique de l'athlète à un moment donné, disponibilité qui est fonction de l'environnement personnel et professionnel, de l'aspect social ou de tout autre facteur externe pouvant être considéré comme une certaine forme de charge mentale (111). Par conséquent, il était important pour nous que les triathlètes utilisent ce score qui prend en considération cette charge interne, et non les seules données des montres connectées issues d'algorithmes basés sur la fréquence cardiaque mesurée au cours de l'effort, même si la corrélation entre fréquence cardiaque et RPE a été démontrée par Foster et al. (110).

Figure 2-7. Echelle du *Rating of Perceived Exertion* (RPE) remise aux triathlètes lors de la visite d'inclusion (données personnelles)

RPE : Rating of Perceived Exertion <small>Echelle de quantification de l'effort perçu</small>		
<p>De façon globale, donnez une seule note entière (pas de 0,5) pour l'effort ressenti dans sa globalité, au cours de la séance passée.</p>		
Score RPE	Degré d'effort	Descriptif
10	Extrêmement difficile, maximal	Effort maximal, maintenu très peu de temps Impossible de continuer Complètement épuisé Incapable de parler
9	Très très difficile	Très difficile de maintenir l'intensité de l'exercice Peine à respirer Ne peut parler que quelques mots
8	Très difficile	Inconfortable Peu de souffle Peut parler une phrase
7	Difficile	Commence à se sentir mal à l'aise Respiration difficile
6	Modérément difficile	Possibilité de continuer Respire fortement
5	Un peu difficile	Peut tenir une courte conversation malgré une forte respiration Encore confortable mais de plus en plus difficile Transpiration plus importante
4	Modéré	Commence à respirer plus fort Peut encore parler Toujours à l'aise mais ça devient difficile
3	Facile	Pas totalement détendu mais pas particulièrement difficile Peut continuer sans difficulté
2	Très facile	Impression de pouvoir tenir pendant des heures Respiration facile Conversation aisée
1	Très très facile	Presque aucun effort (mais plus que dormir, regarder la télévision ...) Promenade calme à son propre rythme

b. Exploitation du document

Toutes les données ont été saisies sur un tableur Excel. L'objectif principal de ce document était de fournir des éléments d'entraînement comme le volume d'entraînement hebdomadaire, l'intensité moyenne de l'entraînement ou encore le nombre de jours de repos. L'objectif secondaire de ce travail était également de fournir une étude de terrain des aspects qualitatifs et quantitatifs de l'entraînement dans une cohorte de triathlètes amateurs longue distance. En effet, la littérature est davantage fournie pour les sports collectifs ou pour les athlètes individuels de haut niveau.

Pour chaque mois, nous avons déterminé la charge d'entraînement quotidienne, ou *daily training load*, qui résulte de l'addition des charges d'entraînement notées sRPE sur un jour donné. Elles sont calculées par le produit de la durée globale de la séance exprimée en minutes avec son RPE exprimé en unités entières de 1 à 10. Cette méthode est d'ailleurs plus connue sous le nom de « TRIMPS », pour *Training Impulse*. Nous avons également déterminé la charge moyenne hebdomadaire, ou *weekly training load*, en additionnant toutes les charges d'entraînement quotidiennes, ainsi que son écart-type. Ces deux derniers paramètres nous ont permis de déterminer :

- la *monotony*, qui correspond au rapport de la charge d'entraînement moyenne hebdomadaire par son écart-type ;
- le *strain* ou contrainte d'entraînement, qui est le produit de la charge d'entraînement moyenne hebdomadaire par la monotonie ;
- le *fitness*, qui résulte de la différence entre la charge d'entraînement moyenne hebdomadaire et la contrainte.

En effet, ces paramètres composites nous permettent d'estimer la charge d'entraînement perçue par l'organisme et son impact sur ce dernier, notamment en termes de récupération. La finalité de leur exploitation permet d'adapter au mieux l'entraînement afin de limiter le risque de blessures voire de surentraînement (112).

Prenons tout d'abord le *weekly training load*. Certains entraîneurs estiment qu'au-delà de 6000 unités de mesure, le syndrome de surentraînement n'est pas loin et que l'athlète frôle les limites – dangereuses – de la fatigue non adaptative. On estime plus globalement que la zone d'entraînement hebdomadaire optimale varie entre 3000 et 5000 unités pour des athlètes bien entraînés (113). En tout état de cause, la théorie s'accorde sur le fait qu'il ne doit pas exister d'augmentation brusque des charges d'entraînement, c'est-à-dire pas d'augmentation d'une semaine à une autre de plus de 10 %.

Pour la *monotony*, cet indice doit se trouver idéalement entre 1 et 1,5 (112). Plus l'indice est bas, meilleure est la réponse de l'athlète. Cet estimateur a été corrélé au début du surentraînement lorsque la monotonie est combinée à des charges d'entraînement élevées. En effet, si la monotonie est supérieure ou égale à 2, alors l'athlète est à la limite entre surmenage et surentraînement. Si elle devient supérieure à 2,5 alors l'athlète est soumis à un risque de blessure important voire de pathologie au long cours. Pour réduire cet indice, il faut soit diminuer l'intensité des efforts ou le volume d'une ou deux séances, soit ajouter du temps de récupération.

Le *strain* apparaît quant à elle comme un outil de contrôle lorsque les charges d'entraînement sont trop élevées. Si les charges d'entraînement sont importantes et le temps de récupération trop faible, alors la contrainte est élevée. A contrario, lorsque les charges d'entraînement sont majeures – ou même faibles – mais que le temps de récupération est suffisant voire important, alors la contrainte est faible. Des corrélations très fortes ont été relevées entre des pics de contrainte et les blessures dans les 10 jours qui ont suivi. Cet indicateur lié aux adaptations négatives et au surentraînement est à surveiller comme le lait sur le feu. Par conséquent, il ne doit pas dépasser idéalement la barre des 6000 unités (113).

Enfin, le *fitness* est un indice associé à la capacité de performance temporaire de l'athlète. Plus il est haut plus l'athlète est en forme (114). Par contre, un fitness négatif à quelques jours de l'échéance n'est pas de bon augure.

B. Acquisitions en tonométrie d'aplanation

1. Principe de la tonométrie d'aplanation

En médecine, la tonométrie correspond à la mesure des pressions, qu'elles soient vasculaires ou oculaires. En ophtalmologie, elle permet notamment de mettre en évidence les augmentations anormales de la pression intra-oculaire, notamment en cas de glaucome. Pour cela, on utilise un tonomètre d'aplanation. Ce dernier repose sur le principe selon lequel la pression qui règne à l'intérieur d'une chambre de pression sphérique, est en relation avec la force qui est capable d'aplanir en partie la surface de cette sphère (116).

Aujourd'hui, la tonométrie d'aplanation est surtout utilisée pour étudier l'onde de pouls (116). Elle permet par exemple de déterminer la pression artérielle centrale ou encore la rigidité artérielle des vaisseaux profonds comme l'aorte, ou davantage superficiels comme l'artère carotide ou l'artère fémorale. Le tonomètre se présente comme un stylo équipé à son extrémité d'un transducteur de pression formé de cristaux piezorésistifs. Il doit être appliqué en regard de l'artère étudiée pour réaliser les mesures. Le principe consiste à « aplanir » l'artère de telle sorte que la pression exercée par le tonomètre soit suffisamment faible pour ne pas occlure celle-ci et surtout, pour ne pas modifier la pression artérielle. Cette pression doit cependant être suffisamment forte pour égaler la pression exercée par le sang sur la paroi. Le capteur enregistre donc la pression dite intramurale qui lui est transmise en s'affranchissant de la pression extramurale (116). Néanmoins, il est nécessaire de calibrer la pression par une méthode de référence comme la mesure oscillométrique de la pression artérielle au bras (117,118).

Pour notre étude, les mesures de la pression artérielle systolique centrale et de la vitesse de propagation de l'onde de pouls aortique ont été réalisées entre l'artère carotide et l'artère fémorale à l'aide d'un tonomètre d'aplanation par un opérateur entraîné. Ces mesures ont également été réalisées sur un site périphérique, à savoir l'artère radiale, gold standard de la mesure.

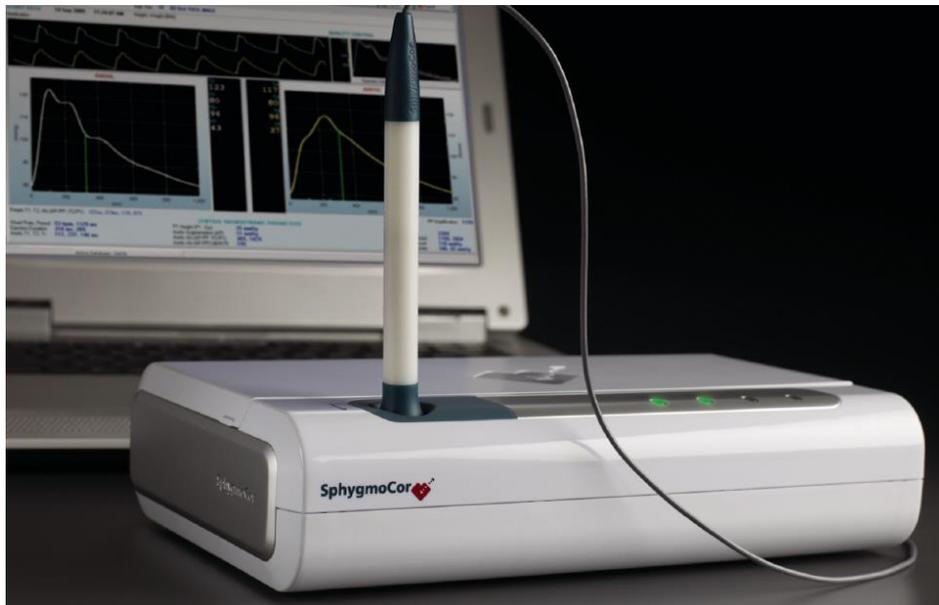
2. Dispositif SphygmoCor®

La technologie SphygmoCor® a été développée par O'Rourke (119) et est utilisée pour l'analyse de la forme de l'onde de pression artérielle centrale (120). En pratique clinique, ce type d'information aide les cliniciens dans le management des pathologies liées à une anomalie de la pression artérielle, comme l'hypertension artérielle ou la néphropathie hypertensive. En effet, il apparaît plus pertinent d'utiliser des données de pression centrale émanant directement de l'aorte, du fait de la grande proximité au moins fonctionnelle de celle-ci avec les organes cibles comme le cœur, le cerveau ou encore les reins (121). SphygmoCor® apparaît comme la norme industrielle pour la gestion de la forme de l'onde de pression artérielle centrale de manière non invasive (122). On distingue deux appareils qui composent la gamme SphygmoCor® :

- Le modèle CvMS, qui utilise un tonomètre d’aplanation pour les mesures de la pression centrale et de la vitesse de l’onde de pouls ;
- Le modèle XCEL, qui couple l’utilisation d’un brassard périphérique avec le tonomètre pour réaliser les mêmes mesures que précédemment, d’utilisation plus aisée désormais.

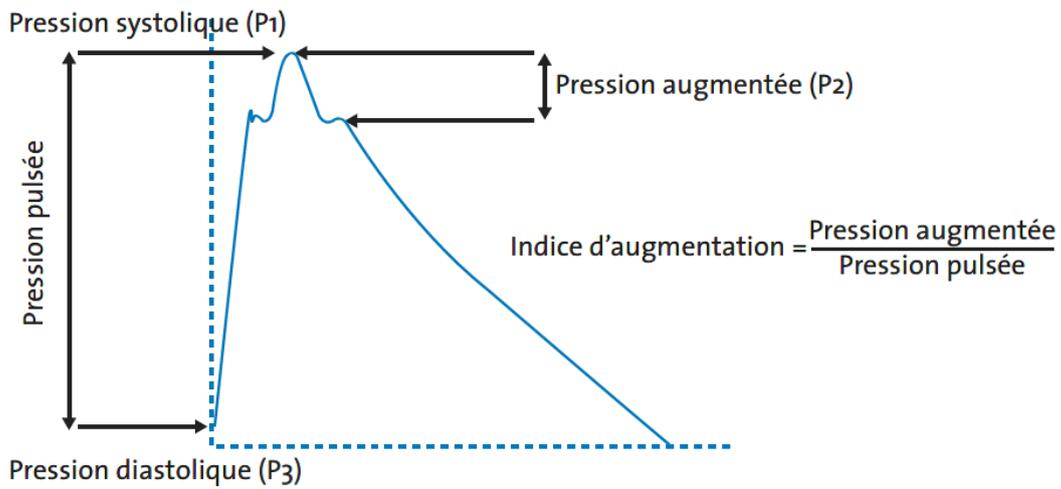
Dans notre étude, nous avons utilisé le SphygmoCor® Cardiovascular Management Suite (CvMS-CP, AtCor Medical, Sydney, Australia) (**figure 2-21**). En effet, la mesure non invasive de la vitesse de l’onde de pouls est le gold standard pour déterminer la rigidité artérielle dont nous avons besoin pour notre étude (86).

Figure 2-21. Dispositif SphygmoCor® CvMS (source www.atcormedical.com)



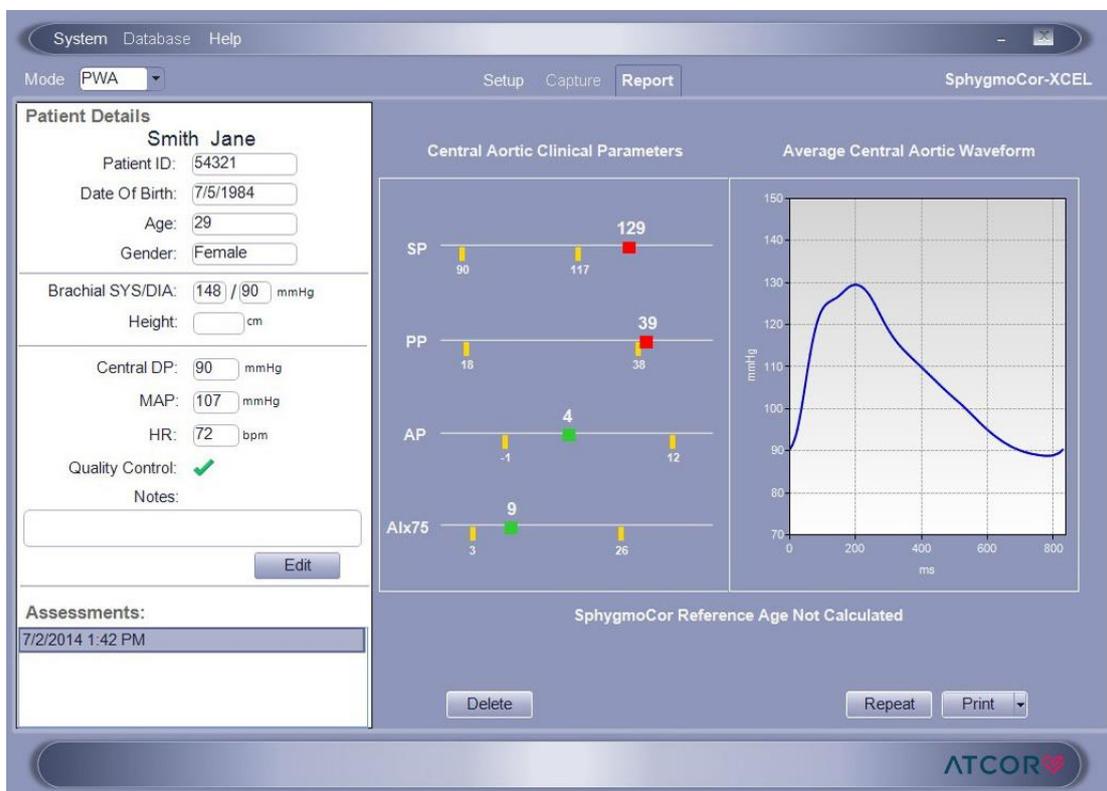
Ce dispositif médical nous est paru intéressant car il permettait de mesurer également les pressions artérielles centrales dont la mesure directe de la pression pulsée, dont nous avons besoin pour calculer la compliance artérielle de l’aorte selon la littérature (84). La **figure 2-22** montre les différents éléments qui constituent l’onde de pression artérielle. Toutes peuvent être déterminées par le SphygmoCor® ainsi que l’indice ou index d’augmentation, qui correspond au rapport de la pression augmentée par la pression pulsée.

Figure 2-22. Eléments constituant l'onde de pression artérielle, d'après Courand et Lantelme, 2012 (123)



Le panneau de contrôle du SphygmoCor® permet d'obtenir instantanément ces paramètres (**figure 2-23**). Un rapide coup d'œil permet de savoir si les valeurs mesurées sont dans la fourchette attendue. Du plus, un graphique de l'onde de pouls centrale permet de vérifier la qualité de la mesure.

Figure 2-23. Panneau de contrôle de SphygmoCor® CvMS (source www.atcormedical.com)



3. Dispositif PulsePen®

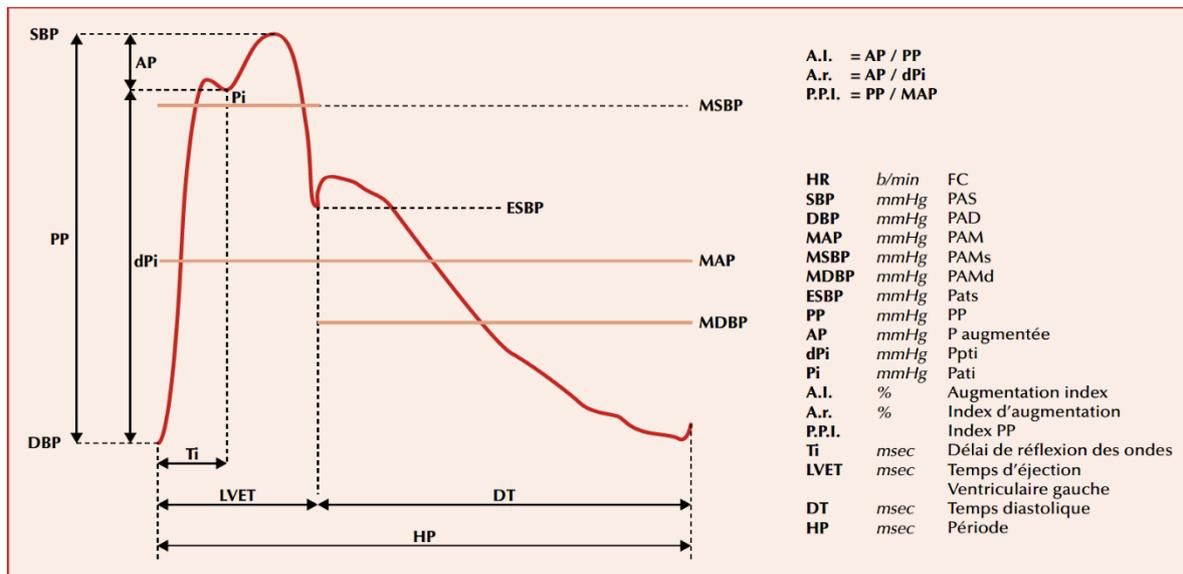
L'appareil PulsePen® est également un appareil de tonométrie d'aplanation. Très maniable du fait de sa petite taille, il a été validé par Salvi et al. en 2004 comme un nouveau tonomètre portable (**figure 2-24**) pour les mesures de la pression aortique centrale, des formes de l'onde de pouls ainsi que sa vitesse (124). Grâce à un logiciel intégré, les mesures sont automatisées et moyennées sur dix cycles cardiaques. Ce dispositif peut également déterminer les valeurs en pic de la pression artérielle systolique, de la pression télésystolique et de la pression télédiastolique au niveau central.

Figure 2-24. Dispositif PulsePen® (source www.pulsepen.com)



Cet outil peut également décomposer l'onde de pouls et calculer les valeurs des ondes de réflexion antérograde et rétrograde, tout en définissant la pression artérielle moyenne systolique et diastolique. Enfin, il peut déterminer l'indice augmentation lié au niveau et au temps de montée précoce de l'onde de réflexion artérielle. La **figure 2-25** illustre les différentes possibilités de mesure.

Figure 2-25. Analyse d'une courbe de pression artérielle centrale avec le tonomètre d'planation PulsePen®, et données mesurées, d'après Joly et al., 2008 (125)



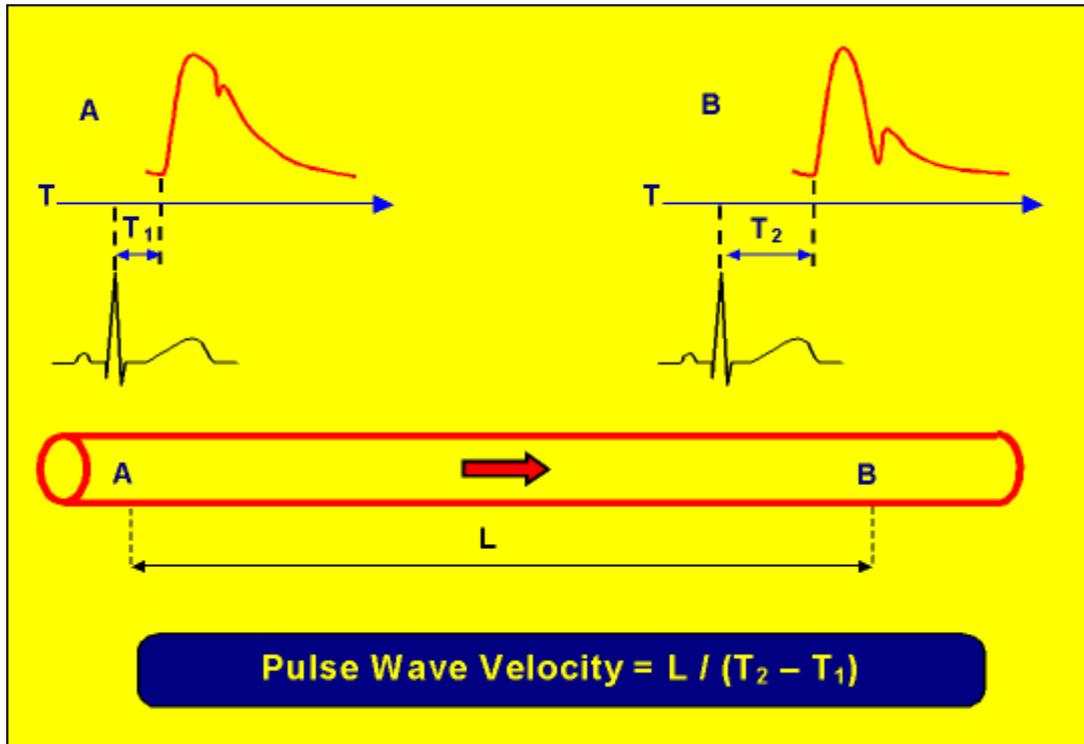
HR = FC : fréquence cardiaque ; PAS : pression artérielle systolique ; PAD : pression artérielle diastolique ; PAM : pression artérielle moyenne ; PAMs : pression artérielle moyenne systolique ; PAMd : pression artérielle moyenne diastolique ; Pats : pression artérielle télésystolique ; PP : pression pulsée ; P augmentée : pression augmentée

Étant donné que la vitesse de l'onde de pouls est définie comme la distance entre les deux sites de mesure divisée par le temps de transit des ondes pulsées correspondantes, le PulsePen® peut automatiquement estimer le temps de transit de deux manières :

- la première nécessite l'utilisation de deux sondes tonométriques de manière à capturer les deux ondes pulsées au niveau des deux sites de mesure ;
- la seconde va utiliser une seule sonde tonométrique associée à celle d'une unité ECG de manière à pouvoir effectuer deux mesures en succession rapide (126).

En effet, le temps de transit a été défini comme la différence entre le retard de l'onde de pouls distale (par rapport à l'onde R appartenant au complexe ECG qRs) et le retard de l'onde de pouls proximale (par rapport à l'onde R appartenant au complexe ECG qRs). En d'autres termes, le retard de l'onde de pouls peut être déterminé en calculant le temps écoulé entre le pic de l'onde R et le pied de l'onde de pouls (127). La **figure 2-26** illustre ces propos.

Figure 2-26. Illustration du calcul de la vitesse de l'onde de pouls utilisant le dispositif PulsePen®
(source www.pulsepen.com)



A : site de mesure numéro 1 (par exemple, l'artère carotide)

B : site de mesure numéro 2 (par exemple, l'artère fémorale)

T : temps

T1 : délai entre l'éjection ventriculaire et le pied de l'onde de pouls au niveau du site de mesure A

T2 : délai entre l'éjection ventriculaire et le pied de l'onde de pouls au niveau du site de mesure B

L : longueur mesurée par l'opérateur entre les sites de mesure A et B

C. Acquisitions en IRM

Dans le cadre de notre protocole COATRI, nous avons utilisé une IRM 3T MAGNETOM Prisma de Siemens AG, Allemagne (software version VE11C) ainsi que ses capteurs ECG et respiratoire dédiés. De plus, nous avons utilisé une antenne cardiaque 18 canaux (**figure 2-8**).

Figure 2-8. Photo d'une IRM 3T Prisma – Siemens (source www.siemens-healthineers.com)



1. Principes méthodologiques de l'IRM cardiovasculaire

a. Notion de gating

L'imagerie par résonance magnétique dédiée à l'exploration du cœur et des vaisseaux profonds, notamment de l'aorte, se heurte à un enjeu de taille à savoir, comment gérer les mouvements des organes intra-thoraciques qui peuvent altérer la qualité des images obtenues. La solution est donc de synchroniser les acquisitions avec la fréquence cardiaque de l'individu et est appelée *gating*. Plus précisément, l'individu est équipé d'un électrocardiogramme dédié avec trois électrodes, de manière à synchroniser les acquisitions sur l'onde R, onde qui constitue le pic du complexe QRS. Ce choix repose sur le fait que l'onde R est généralement de bonne amplitude et qu'elle précède le début des phénomènes mécaniques. En d'autres termes, la synchronisation se fait

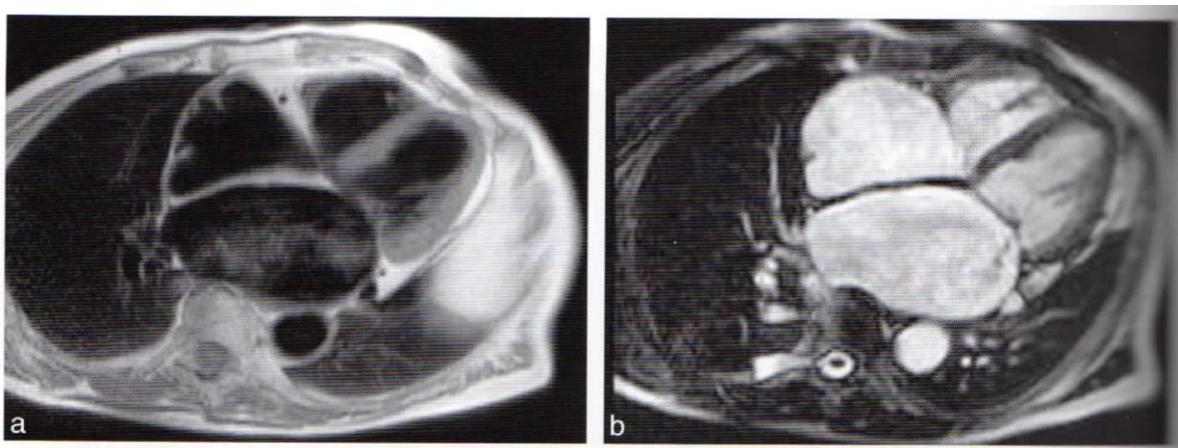
selon la fin de la diastole mécanique (128). Au besoin, la synchronisation cardiaque peut être complétée par une synchronisation respiratoire, à l'aide d'une ceinture placée au niveau abdominal, ce qui a été notre cas.

b. Types de séquences

i. De l'écho de spin à la b-SSFP

Classiquement, l'IRM cardio-vasculaire fait appel à deux grandes familles de séquences, à savoir l'écho de spin et l'écho de gradient (**figure 2-9**). La première est davantage utilisée pour obtenir des informations anatomiques grâce à des images « sang noir ». La seconde est optimisée pour évaluer l'aspect fonctionnel du cœur, que ce soit pour étudier sa contraction ou pour étudier son hémodynamique : on parle alors de ciné-IRM.

Figure 2-9. Image IRM d'une séquence de type écho de spin (a) et de type écho de gradient (b), d'après *Comprendre l'IRM, 2011* (128)

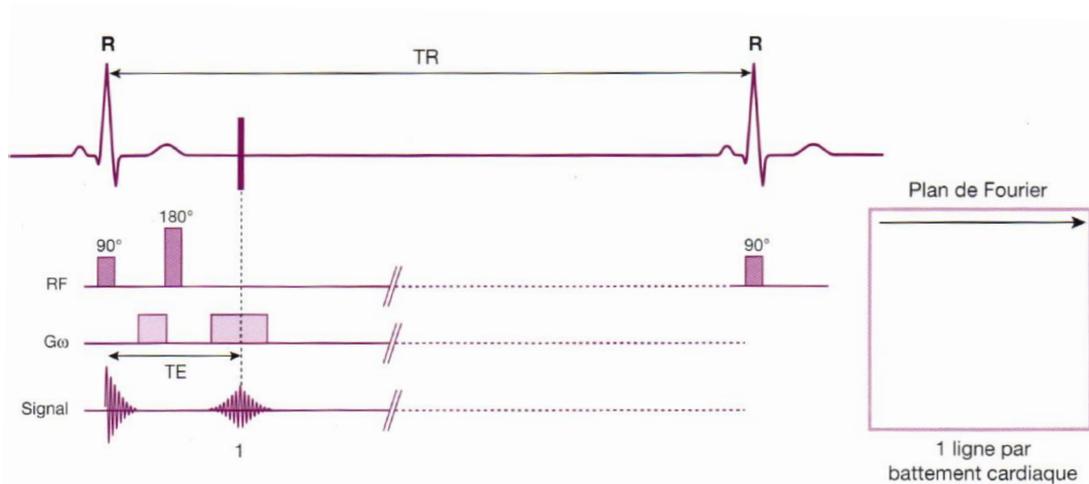


a : écho de spin ; imagerie anatomique, statique, contraste « sang noir »

b : écho de gradient ; imagerie ciné, aspect fonctionnel, contraste « sang blanc »

En écho de spin, deux impulsions RF sont appliquées au signal. La première à 90° va exciter les protons puis la seconde, sélective à 180° , va permettre de refocaliser des spins en donnant le signal d'écho après le temps d'écho (TE). Dans la mesure où on acquiert une ligne du plan de Fourier à chaque battement cardiaque, il faudra au moins 256 QRS avant de pouvoir reconstruire une image. Seuls les spins qui ont reçu les deux RF donneront un signal pour lequel les tissus stables, c'est-à-dire autres que le sang circulant, seront visibles (128). La **figure 2-10** illustre ces explications.

Figure 2-10. Illustration schématique de la physique d'une séquence écho de spin basique en imagerie cardiaque, d'après Comprendre l'IRM, 2011 (128)



RF : radiofréquence ; TR : temps de répétition ; $G\omega$: gradient de champ magnétique ; TE : temps d'écho
 La séquence est déclenchée par l'onde R de l'ECG. Chaque battement cardiaque (QRS) dicte le temps de répétition TR et commande le processus : excitation puis recueil d'un signal d'écho, correspondant à une ligne du plan de Fourier.

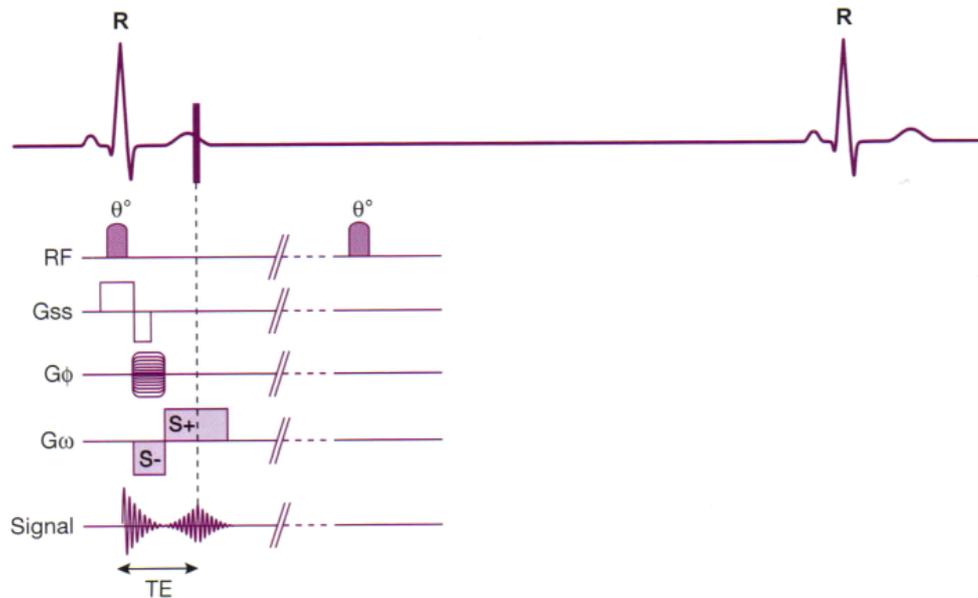
Comme le TE est court par rapport à l'intervalle R-R qui sépare deux battements cardiaques, il est possible de répéter ce processus sur plusieurs autres niveaux de coupe pour optimiser le temps d'acquisition. Il est alors nécessaire de connaître le temps exact pour chaque coupe afin de procéder aux différentes mesures de volumes cavitaires ou d'épaisseur tissulaire. C'est pourquoi ce type de séquences n'est pas une bonne méthode pour les mesures fonctionnelles (128). De plus, la séquence écho de spin est très sensible aux artefacts de mouvement engendrés par la respiration, tout comme l'hypersignal de la graisse altère l'image myocardique. Par conséquent, cette séquence a été abandonnée au profit de l'écho de gradient, davantage adaptée au contraste vasculaire et aux séquences ciné.

ii. Séquence en écho de gradient

En écho de gradient, il faudra toujours compter au moins 256 signaux d'écho pour obtenir les 256 lignes du plan de Fourier mais avec une petite différence. En effet, une seule impulsion RF d'angle de bascule faible, soit aux environs de 30°, est appliquée au signal. Le signal d'écho résulte ici de l'inversion du gradient de lecture au temps TE. De ce fait, tous les spins intravasculaires vont ainsi contribuer à un signal d'écho fort, faisant apparaître le sang comme blanc alors que les tissus stationnaires vont apparaître de tonalité plus sombre, en raison des temps de relaxation courts. Ainsi le contraste avec le sang circulant est davantage marqué. Ajoutons à cela que ce type de séquence est adéquat pour les acquisitions en mode ciné, du fait de la répétition des excitations dans la même coupe cardiaque au cours d'un seul cycle (128). La **figure 2-11** illustre ces explications.

Initialement, les séquences ciné en écho de gradient utilisaient des TR longs, c'est-à-dire autour de 30 à 40 ms, et en respiration libre. Par conséquent, il fallait 256 cycles cardiaques pour remplir le plan de Fourier. Ajoutons à cela que les artefacts respiratoires observés pour les séquences en écho de spin, se retrouvaient également pour ces séquences, rendant les images particulièrement floues. Le remède était donc de réaliser ces séquences en apnée, ce qui peut poser un souci de faisabilité chez certains patients. Une autre alternative était de développer des séquences utilisant un TR court, c'est-à-dire inférieure au temps de relaxation transversale $T2^*$, car une part d'aimantation transverse résiduelle contribue au signal d'écho. Par conséquent, les séquences *Steady-State Free Precession* (SSFP) se sont alors largement développées jusqu'à l'avènement des séquences de type *balanced Steady-State Free Precession (bSSFP)*, qui ont pour argument majeur d'améliorer considérablement le rapport signal sur bruit (128). En effet, pour ce dernier type de séquence, il existe une compensation de flux appliquée à l'ensemble des gradients mis en jeu, c'est-à-dire que le déphasage des spins entre deux excitations successives, soit durant l'intervalle TR, est exactement égal à zéro.

Figure 2-11. Illustration schématique de la physique d'une séquence écho de gradient basique en imagerie cardiaque, d'après Comprendre l'IRM, 2011 (128)



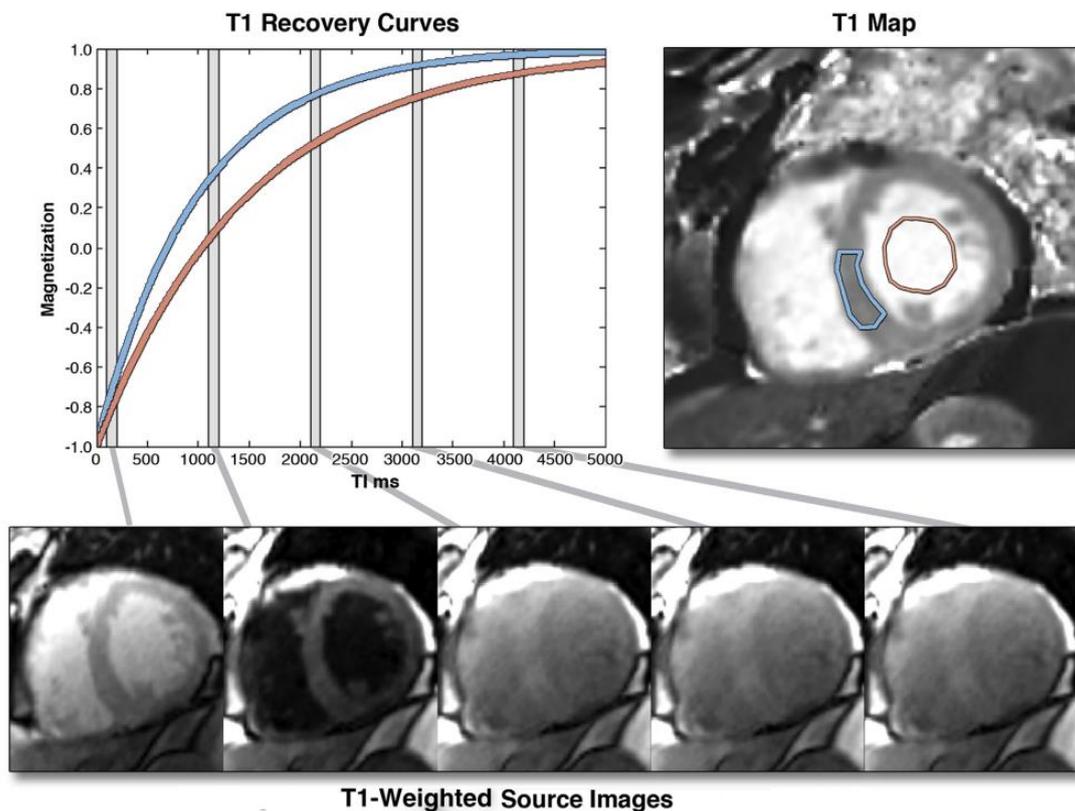
RF : radiofréquence ; Gss : gradient de sélection de coupe ; Gφ : gradient de codage de phase ; Gω : gradient de champ magnétique ; TE : temps d'écho

En écho de gradient, une seule impulsion d'excitation θ est appliquée. Le signal d'écho apparaît au moment où la surface négative sous la courbe du gradient de lecture (S-) est égale à la surface sous la courbe positive du gradient (S+). En mode « ciné », ce motif est répété (vingt fois par exemple) lors des phases successives du cycle cardiaque, pour pouvoir construire une série d'images en boucle qui reproduiront un pseudo-cycle cardiaque.

iii. Séquences T1 Map

Le temps de relaxation longitudinale noté T1 correspond à une mesure de la vitesse mise par un spin pour revenir à son état d'équilibre à partir d'un état de magnétisation induit par une impulsion RF dans un champ magnétique donné. Grâce à la sensibilité de l'IRM pour les différences de contraste au sein des tissus mous, il est désormais possible d'obtenir des cartographies T1 pour un tissu ou un organe donné, cartes pour lesquelles chaque pixel représente le T1 dans chaque voxel, plutôt que d'utiliser des variations d'intensité du signal en unités arbitraires. Par ailleurs, ces variations même relativement faibles du T1 au sein du myocarde dans notre étude, peuvent être objectivées (129). La récupération de l'aimantation longitudinale après inversion est plutôt bien approchée par une fonction exponentielle. T1 apparaît comme une constante de décroissance d'un état de magnétisation vers un état d'équilibre basal. La **figure 2-12** illustre ces propos.

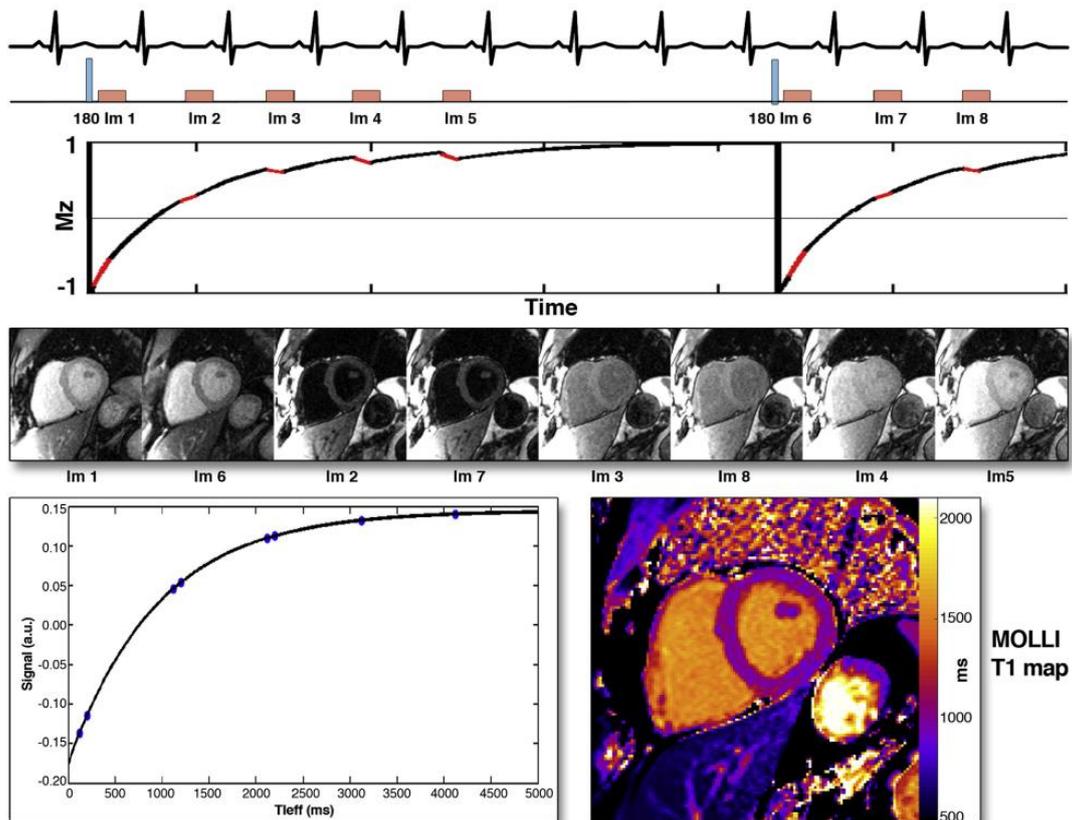
Figure 2-12. Illustration de la récupération de l'inversion de magnétisation pour la cartographie T1, d'après Taylor et al., 2016 (129)



The graph on the **left** shows 2 inversion recovery curves for a septal region of interest (**blue**) and the blood pool, generated from images, shown in the **bottom row**, taken at different times after an inversion pulse at time $t = 0$. Similar inversion recovery curves can be generated for each pixel location if the images are all acquired during a breath-hold and for the same cardiac phase. The T1 for each pixel location can be used to generate a T1 map, as shown in the **top-right** image. T1 maps represent arguably the most succinct and informative summary of the spatial and temporal changes during an inversion recovery.

La cartographie T1 dépend cependant de plusieurs paramètres qui vont influencer sur les échanges d'énergie entre le spin étudié et l'environnement dans lequel il évolue, comme la composition moléculaire d'un tissu, son état d'hydratation, son fonctionnement ... Le principe général de cette méthode repose sur l'acquisition de plusieurs images avec des pondérations T1 différentes, de manière à ce que les intensités du signal des images correspondent à l'équation de relaxation notée $(A - B) * e^{-t/T1}$, avec A et B les paramètres appropriés au tissu étudié, et en fonction de la magnétisation induite, et t le temps issu de la magnétisation. Les T1 peuvent être déterminés pour chaque région d'intérêt ou pour chaque pixel d'une cartographie donnée (129). La **figure 2-13** illustre ces propos.

Figure 2-13. Cartographie T1 sur séquence MOLLI, d'après Taylor et al., 2016 (129)



Acquisition strategy for the modified Look-Locker sequence (MOLLI). In this particular example, and after an 180° inversion pulse, images are acquired in diastole over 5 heartbeats, followed by a rest period of 3 heartbeats. After another inversion, another 3 image are acquired with slightly offset TIs to sample more points along the inversion recovery curves. Based on the number of heartbeats for acquiring images after each inversion pulse, and a rest period of 3 heartbeats between the 2 cycles, this MOLLI acquisition scheme is termed 5(3)3. Images are sorted in order of increasing TI, and the signal intensity in each pixel is fit to the T1 recovery curve. Performing this technique for all pixels in the image yields a T1 map (bottom right).

Auparavant, la technique de quantification T1 utilisait une série d'images préparées par inversion-récupération, fournissant des cartographies T1 calculées pour une phase spécifique du cycle cardiaque mais qui était source d'erreur. Cette technique a été supplantée par une nouvelle méthodologie permettant d'acquérir toutes les données d'une cartographie T1 en une seule acquisition en apnée (129) : c'est la technique du *look-locker*. Cette dernière permet d'obtenir des images de manière répétée après impulsion de radiofréquence, de façon à créer de multiples images parallèlement à la courbe de récupération du T1, et ce pour chaque T1 défini de façon précise. Le processus d'acquisition est répété après une période de l'ordre de « 5 x T1 » pour permettre une récupération de l'aimantation entre les « cycles » de *look-locker*. Grâce à cela, un grand nombre d'images est disponible pour déterminer le plus justement possible les cartographies de T1.

La séquence *look-locker* a toutefois rapidement évolué vers la séquence *modified look-locker pulse sequence* dite MOLLI, qui a constitué une avancée significative dans la détermination des cartographies T1 pour la pratique clinique par rapport aux techniques antérieures (130). En effet, les images sont acquises de façon intermittente en une seule séquence et au cours de la diastole pendant trois à cinq battements cardiaques, après l'impulsion d'inversion RF. De cette manière, les images sont espacées de l'intervalle RR le long de la courbe de récupération T1. L'utilisation d'inversions multiples avec des T1 légèrement différents permet d'échantillonner de manière plus homogène la courbe de récupération du T1 d'un tissu. Cette technique s'est avérée très reproductible et donne des images avec un rapport signal sur bruit élevé (130).

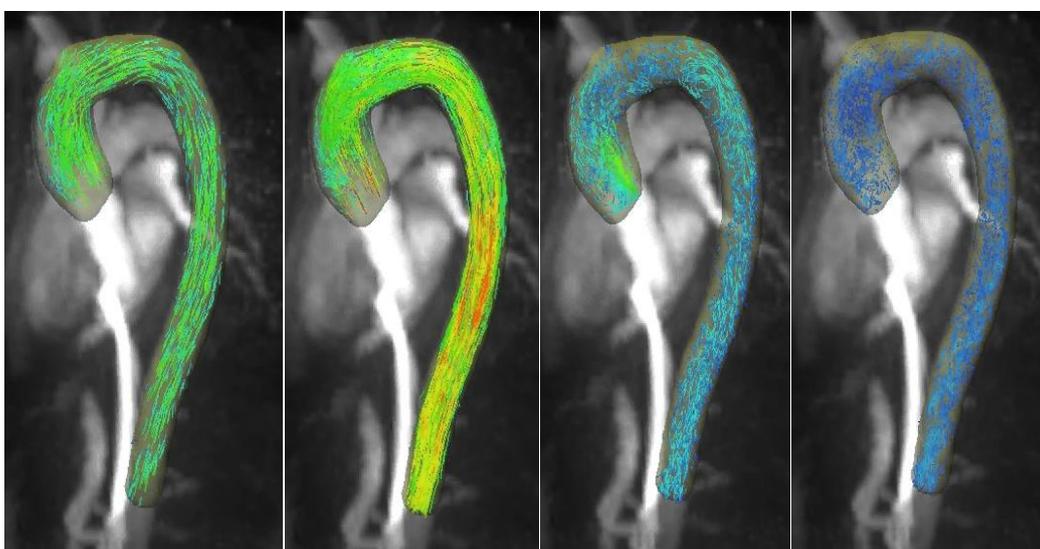
iv. Séquences *4D Flow*

La *4D Flow* est un type de séquence utilisé en IRM cardiovasculaire. Elle utilise le contraste de phase qui permet de coder le flux sanguin dans les trois dimensions de l'espace tout en y associant une quatrième dimension, à savoir celle du temps (3D + temps = 4D), d'où le terme flux 4D ou *4D Flow* en anglais. Cette technique quelque peu unique en son genre permet d'étudier les différents aspects du flux sanguin, partant du fond ventriculaire pour aller jusqu'à l'aorte par exemple, permettant d'étudier les effets de l'hémodynamique sur les parois vasculaires mais également myocardiques (131).

Actuellement, l'échocardiographie Doppler est encore l'outil le plus couramment utilisé en pratique clinique pour évaluer les vitesses et les pressions dans le système cardiovasculaire central, du fait notamment de sa disponibilité et de l'obtention rapide des résultats. Mais cet outil est opérateur dépendant et souffre d'un certain manque de reproductibilité de la mesure. Grâce à l'amélioration des séquences, la CMR avait déjà approché dans les années 2000 les bénéfices de l'écho-Doppler par le biais de la *2D cine PC-CMR*, autrement dit la ciné IRM cardiovasculaire à contraste de phase en deux dimensions. Pour ce type de séquence, on détermine un plan en deux dimensions à travers duquel on s'intéresse au codage de la vitesse du flux qui passe de façon perpendiculaire au plan défini. Cette séquence devient rapidement le gold-standard pour ce type d'acquisition mais souffre d'un manque d'accessibilité au quotidien.

Avec l'évolution des séquences et de la technique en elle-même au cours des dix dernières années, la *4D Flow* apparaît comme un outil de choix dans l'étude plus poussée des flux sanguins centraux, notamment pour estimer les flux de dérivation, de régurgitation ou encore les flux collatéraux (132), grâce à une quantification précise mais également à la reproductibilité de la mesure. La *4D Flow* a également le gros avantage de permettre le placement rétrospectif – c'est-à-dire au moment du post-traitement – des plans d'analyse à n'importe quel endroit du volume de l'acquisition, et de calculer les différents débits, contrairement à la *2D cine PC-CMR* qui se limite à un seul plan. Sur le plan clinique, cette technique permet d'analyser le flux sanguin au niveau des ventricules et des oreillettes mais également à proximité des valves cardiaques, ou encore au sein des gros vaisseaux comme l'aorte (**figure 2-14**) ou l'artère pulmonaire. Elle permettrait donc d'étudier les conséquences hémodynamiques d'une cardiopathie et leur possible impact structurel et fonctionnel sur l'arbre cardiovasculaire, et donc de compléter nos connaissances en physiologie et physiopathologie cardiovasculaire (131). Grâce à une implication des équipes de recherches travaillant sur le développement à visée clinique des séquences en *4D Flow*, il pourrait être envisageable de mieux appréhender la signification d'une modification du flux sanguin et ses répercussions sur le plan clinique. De plus, grâce à une acquisition avant et après chirurgie, elle permettrait de caractériser avec certitude la restauration d'une hémodynamique normale après chirurgie d'une cardiopathie congénitale type tétralogie de Fallot par exemple.

Figure 2-14. Imagerie de l'aorte thoracique en séquence de flux 4D (images personnelles)



Les différentes images représentent quatre temps successifs au cours d'un même cycle cardiaque. La cartographie de couleurs montre la vitesse du flux sanguin, du plus rapide en rouge, au plus lent en bleu foncé.

Etant donné que, d'après la littérature, la pratique sportive assidue et chronique implique un remodelage au moins cardiaque et donc une modification du couplage ventriculo-aortique, nous avons formulé l'hypothèse que des modifications du flux sanguin chez les triathlètes pourraient exister et être objectivées grâce à la *4D Flow*. Ces suppositions s'appuient sur des travaux plus ou moins récents, comme ce travail de Hope et al. paru en 2011 sur l'utilisation de la *4D Flow CMR* pour évaluer les conséquences hémodynamiques d'une bicuspidie aortique sur le remodelage de l'aorte ascendante, pouvant évoluer jusqu'à l'anévrisme (133). Les auteurs ont pu démontrer que, comparativement aux sujets contrôles avec une valve aortique tricuspide, les sujets bicuspidés présentaient un *wall sheer stress* (WSS) plus élevé et donc un risque plus important de développer à moyen voire long terme, un anévrisme de l'aorte thoracique ascendante. Ces observations ont d'ailleurs été confirmées par Meierhofer et al. en 2013 (134). Ajoutons aussi que Köhler et al. s'intéressent également à la *4D Flow CMR* pour quantifier de façon précise au niveau aortique le volume éjecté par le VG, considérant donc davantage son hémodynamique (135). Parallèlement à l'aorte, d'autres équipes se sont penchées sur l'intérêt que pourrait avoir la *4D Flow* pour étudier l'hémodynamique intra-cardiaque cette fois-ci. Citons le travail de Van der Geest et Garg qui montrent le lien entre modifications du flux ventriculaire, et valvulopathies ou dysfonction ventriculaire (136) ; ou encore cette revue de la littérature de Crandon et al. parue en 2017 sur ce nouveau domaine de recherche précis (137). Enfin, nous avons vu en la *4D Flow* la possibilité d'éventuellement comparer – IRM versus tonométrie d'aplanation – nos données de recherche autour de la VOP, ce qui semble être dans l'ère du temps, au vu de cet article récent (2019) de Houriez-Gombaudo-Saintonge et al. sur cette même idée (138).

La *4D Flow* apparaît donc comme un bel outil aux possibilités étendues (139). Outre la difficulté du post-traitement et de l'interprétation des données extraites, cette séquence souffre d'une certaine limite dans sa faisabilité : le temps nécessaire à l'acquisition des images (et à leur reconstruction). C'est pourquoi, même si les constructeurs s'affairent à développer des outils complémentaires pour accélérer l'acquisition des images en temps réel (140), l'optimisation du paramétrage reste d'une importance majeure. Ou comment trouver un bon compromis entre le temps d'acquisition et la qualité du signal.

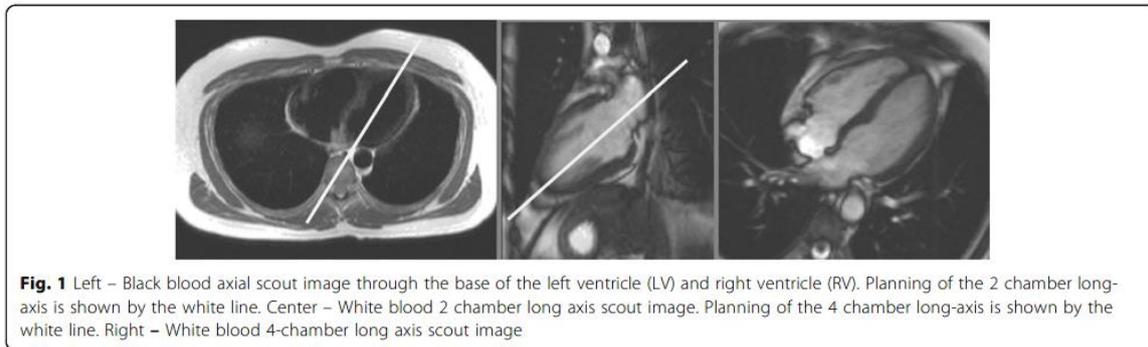
c. *Recommandations de la SCMR*

Dans sa mise à jour parue en 2020, la Société d'IRM cardiovasculaire (*Society for Cardiovascular Magnetic Resonance, SCMR*) émet des recommandations quant à la réalisation des IRM à visée cardiovasculaire (141), recommandations que nous avons souhaité rappeler ici, même si nos IRM ont été réalisées avant cette date.

Dans la majorité des cas, les examens sont réalisés avec une IRM à 1,5T même si de plus en plus d'études font appel à des systèmes à 3T, avec ses avantages et ses inconvénients. L'IRM 3T semble supérieure pour l'imagerie de perfusion grâce à un contraste amélioré en raison d'un meilleur rapport signal sur bruit (*SNR*) mais également pour l'imagerie de rehaussement tardif avec injection de gadolinium. De plus, elle est plus performante pour les séquences en flux 4D. Toutefois, bien que les séquences *bSSFP* soient considérées comme le gold standard pour l'imagerie ciné à 1,5T, la sensibilité de ces séquences à 3T peut engendrer des artefacts tant en image statique qu'en flux. Enfin, si le *gating ECG* est perturbé par un champ magnétique à 3T, alors il est possible d'utiliser un déclenchement périphérique à distance.

Pour l'imagerie du ventricule gauche, l'acquisition commence par une séquence de repérage/localisation dite *scout imaging* selon les coupes transaxiale, coronale et sagittale. Généralement, ces séquences sont réalisées au cours d'un seul cycle cardiaque et en apnée. Pour la coupe 2 cavités, l'axe doit passer par l'apex et le centre de la valve mitrale, et doit être orthogonal à la coupe transaxiale obtenue en *scout imaging*. Pour la coupe 4 cavités, l'axe doit passer par le centre de la valve mitrale, l'oreillette gauche et au milieu du ventricule gauche. Il doit être perpendiculaire à l'axe déterminé sur la coupe deux cavités. La **figure 2-15** illustre ces propos.

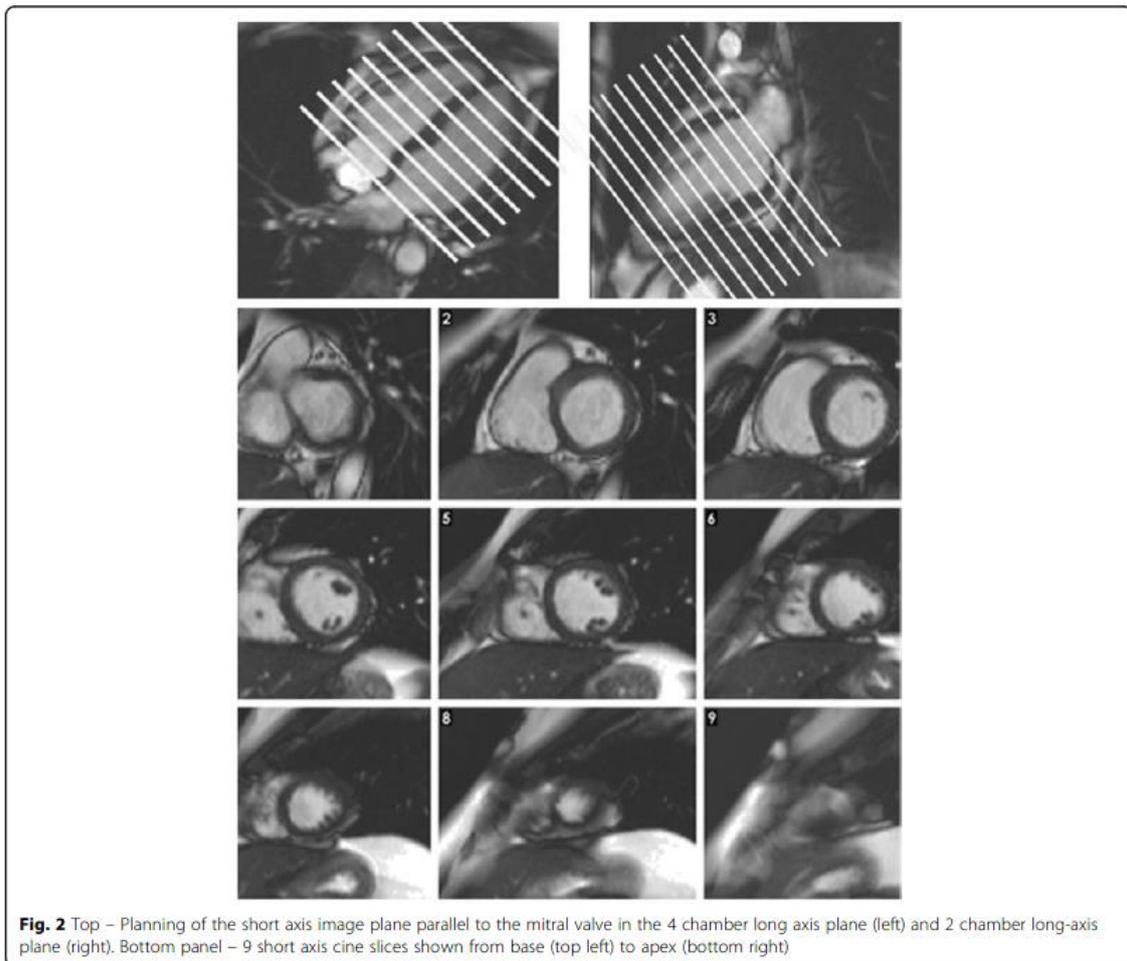
Figure 2-15. Plans de coupe long axe recommandés pour l'imagerie du ventricule gauche, d'après Kramer et al., 2020 (141)



Les séquences *bSSFP* restent la méthode de référence pour l'imagerie ciné grâce à un excellent *SNR* et à un excellent contraste entre les tissus myocardiques et le sang. En cas d'artefacts générés par un champ à 3T, les séquences en écho de gradient peuvent être une alternative aux séquences *SSFP*. Une autre possibilité est de réduire la résolution temporelle ou d'ajuster la radiofréquence grâce à la séquence *frequency scout*. Les images ciné doivent être acquises en apnée, préférablement après expiration, ce qui a été retenu pour notre protocole.

Pour les acquisitions ciné en petit axe sur séquences *bSSFP*, les images sont obtenues de la base du ventricule gauche jusqu'à son apex. Le premier plan doit être déterminé en utilisant les vues en 4 et 2 cavités long axe, et doit être perpendiculaire à l'axe longitudinal du ventricule gauche, sans qu'il ne soit forcément parallèle au plan de la valve mitrale. L'épaisseur de coupe doit être de 6 à 8 mm, avec ou sans espace intercoupe, qui doit être de 2 à 4 mm au besoin. Chaque coupe doit faire 10 mm maximum au total. La résolution temporelle doit être inférieure ou égale à 45 ms entre les différentes phases, de manière à optimiser l'évaluation de la mobilité des parois ventriculaires. La **figure 2-16** illustre ces propos.

Figure 2-16. Planification des coupes en vue petit axe (images de la première ligne) suivie des images correspondant aux neuf niveaux de coupe (n°1 à 9), d'après Kramer et al., 2020 (141)



Cette séquence nous a permis de réaliser l'évaluation IRM de la fonction cardiaque de nos volontaires (séquence dite « PA TRUFI FCN CINE»).

Pour les acquisitions en « grand axe », pour la coupe 2 cavités, on utilise la coupe de repérage vertical en long axe, qui peut être modifiée de manière à passer par les parois myocardiques inférieures et antérieures. Pour la coupe 4 cavités, on utilise la coupe précédente – qui doit passer par l'apex et le centre de la valve mitrale – qui doit également passer par le centre de la valve tricuspide.

Pour l'imagerie de flux, la *SCMR* recommande de préférer le *scout imaging* ou encore les séquences ciné en écho de gradient, utilisant un seul plan d'acquisition. Pour des résultats optimaux, il est conseillé de centrer le plan de coupe sur le vaisseau étudié, plan qui sera positionné de façon orthogonale au flux sanguin principal. Les paramètres recommandés sont une épaisseur de coupe de 5 à 8 mm avec une résolution dans le plan de coupe d'au moins 1/10 du diamètre du vaisseau. La sensibilité du codage de la vitesse notée V_{enc} doit être adaptée aux vitesses envisagées. La vitesse la plus basse disponible et sans *aliasing* doit être préférée. Après chaque acquisition, chaque image doit être vérifiée à la recherche d'*aliasing*, ou d'artéfact de repliement. Auquel cas, V_{enc} doit être augmentée en conséquence. La résolution temporelle entre chaque phase doit être préférentiellement inférieure ou égale à 50 ms. Afin de faciliter la lecture des images, la segmentation en k-espaces sur plusieurs cycles cardiaques est utilisée pour limiter le temps d'acquisition au cours d'une seule apnée. De son côté, le temps d'écho TE doit être le plus court possible.

En ce qui concerne la cartographie T1, cette séquence doit être acquise en l'absence de produits de contraste et utilise le type *look locker imaging (M*Odified *L*ook *L*ocker *I*nversion *r*ecovery dit MOLLI). Dans le cas de notre population d'étude, l'acquisition en diastole est la référence. L'épaisseur de coupe doit être de 6 à 8 mm tandis que la résolution dans le plan de coupe doit être de 1,6 à 2 mm. Le nombre de coupes obtenues et leur orientation dépendront de l'indication. Cependant, au moins une coupe petite axe doit être réalisée. Pour notre étude, nous avons choisi de réaliser trois plans de coupe au sein du ventricule gauche ainsi qu'un plan de coupe à travers l'aorte, dans l'espoir de pouvoir mesurer sa cartographie T1 malgré la très fine épaisseur de ce vaisseau.

2. Protocole IRM pour COATRI

a. Détermination du protocole dans sa globalité

Pour cette étape, nous nous sommes basés sur le protocole « cardio » déjà utilisé en pratique clinique au CHRU de Nancy, que nous avons complété par quelques séquences complémentaires au vu de nos hypothèses de travail sur le papier.

Nous avons débuté avec les coupes de repérage selon les recommandations de la *SCMR* pour l'exploration de la fonction ventriculaire gauche (141). Une fois la localisation faite, nous avons lancé les différentes séquences en petit axe et grand axe, ainsi que l'imagerie de la fonction ventriculaire en petit axe. Comme conseillé par la *SCMR*, nous avons mis en option une séquence *frequency scout* en cas d'artefacts sur les premières acquisitions.

Pour l'imagerie de flux au niveau de l'aorte ascendante, nous avons programmé une acquisition en *bSSFP*, que nous avons complétée par une séquence en contraste de phase en cas d'artefacts de flux majeurs sur la première des deux acquisitions. En toute fin de protocole, nous avons répété la coupe en contraste de phase, lancée quelques secondes après deux minutes de pompage avec les mains et des battements de jambes simultanés, afin d'augmenter la fréquence cardiaque.

Pour le *mapping T1*, nous avons organisé cette séquence en trois coupes ventriculaires en petit axe, de manière à couvrir l'ensemble du ventricule gauche. Nous avons également fait une acquisition sur une coupe au niveau de l'aorte ascendante, dans l'idée de faire du *mapping T1* sur la paroi aortique si la résolution spatiale était suffisante.

Nous avons également programmé une séquence dédiée à la mesure de la vitesse de l'onde de pouls (VOP) en IRM dans l'optique de comparer les résultats obtenus avec ceux mesurés en tonométrie d'aplanation qui, rappelons-le, reste le gold standard pour la détermination de ce paramètre.

Enfin, nous avons ajouté une séquence en *4D flow* avec son repérage préalable, couvrant le ventricule gauche et l'ensemble de l'aorte thoracique. Quelques mois plus tôt, nous avons fait plusieurs essais sur des volontaires hors protocole COATRI afin d'optimiser le paramétrage de la séquence, tant sur le plan de la qualité du signal lié au flux, que sur le temps d'acquisition, notre protocole ne devant pas dépasser les 60 minutes d'acquisition au total. Ces essais sont relatés dans un paragraphe dédié.

Par conséquent, la version finale de notre protocole d'étude est présentée dans le **tableau 2-3**.

Tableau 2-3. Protocole de l'étude COATRI, rédigé à l'attention des manipulateurs IRM et complété par nos soins

CICIT_CARDIO_17-101 COATRI	
NOM de la séquence	Description pour le manipulateur IRM
LOC SAG/ISOCENTRE	<i>Placer l'isocentre (ligne bleue) au milieu du cœur</i> FOV = 400 mm 11 coupes avec Ep = 8 mm
LOC CORO-AX	Repérage un plan FOV = 400 mm 3 coupes avec Ep = 8 mm
AA heart scout	<i>Placer les coupes comme sur le schéma</i> FOV = 400 mm 18 coupes avec Ep = 10 mm
LOCA REPERE CARDIO	<i>Replacer les petits index colorés selon l'exemple</i> FOV = 500 mm 1 coupe avec Ep = 8 mm
GA TRUFI CINE PAT 4	<i>[bSSFP] une coupe 4 cavités, une coupe 2 cavités et une coupe 3 cavités</i> FOV = 340 mm avec Ep = 6 mm TR = 26,64 ms ; TE = 1,46 ms
Si FLUX	<i>Noter la fréquence si flux au niveau du GA</i>
Frequency Scout (si GA artefacté)	<i>[frequency scout] une coupe 4 cavités</i> FOV = 340 mm avec Ep = 6 mm <i>Se mettre dans VISUALISATION et voir pour quelle valeur l'image est la meilleure</i>
GA TRUFI CINE PAT4	<i>[bSSFP] une coupe 4 cavités</i> TR = 26,64 ms ; TE = 1,46 ms <i>A refaire en changeant la valeur « -Delta Trufi »</i>
GA TRUFI CINE	<i>[bSSFP] une coupe 4 cavités, une coupe 2 cavités et une coupe 3 cavités</i> FOV = 340 mm avec Ep = 6 mm TR = 26,64 ms ; TE = 1,46 ms
PLANIF PA	<i>Programmer la totalité du PA et définir le sous-ensemble PA (3 coupes)</i> <i>[bSSFP] FOV = 500 mm</i> 12 à 15 coupes avec Ep = 8 mm TR = 240,41 ms ; TE = 1,06 ms

PA TRUFI FCN CINE	<p>Programmer la couverture de l'ensemble du PA comme définie pour la séquence précédente</p> <p>[bSSFP] FOV = 340 mm avec Ep = 8 mm TR = 25,44 ms ; TE = 1,4 ms ; matrice = 224 ; angle de bascule = 45°</p>
T1 MAP PA 3 COUPES	<p>[mapping T1] trois coupes PA dont 1 médio-ventriculaire FOV = 360 mm avec Ep = 8 mm TR = 283,26 ms ; TE = 1,12 ms ; angle de bascule : 31°</p> <p>ECG prospectif : capturer le cycle</p>
DEBIT AORTIQUE	<p>[contraste de phase] une coupe perpendiculaire à l'aorte ascendante FOV = 340 mm avec Ep = 6 mm ; Venc ~ 150 cm/sec TR = 37,76 ms ; TE = 2,55 ms ; matrice = 192 ; angle de bascule = 20°</p>
AX OBL AORTE TRUFI CINE	<p>[bSSFP] une coupe perpendiculaire à l'aorte ascendante (<i>même coupe que « débit aortique »</i>) FOV = 340 mm avec Ep = 6 mm TR = 20,58 ms ; TE = 1,5 ms</p>
T1 MAP AORTE	<p>[mapping T1] même coupe que débit aortique FOV = 360 mm avec Ep = 6mm TR = 299,88 ms ; TE = 1,22 ms</p>
REPERAGE 4D FLOW	<p>Placer correctement le tracker (<i>en paire croisée</i>) ECG prospectif : cycle capturé Evaluer l'amplitude respiratoire et reporter les données sur la séquence « 4D FLOW » Séquence liée à la suivante uniquement pour le tracker</p> <p>FOV = 320 mm avec Ep = 2,5 mm TR = 337,94 ms ; TE = 1,16 ms</p>
4D FLOW RETRO	<p>[4D flow] mêmes coupes et même tracker que repérage Reporter les valeurs trouvées sur le repérage : Onglet Physio → PACE → valider position (vert)</p> <p>FOV = 421 mm avec Ep = 3 mm TR = 38,72 ms ; TE = 2,29 ms ; angle de bascule = 7°</p>
VOP 2 COUPES RESPI LIBRE 1 NEX	<p>Deux coupes axiales strictes en respiration libre (<i>activer « graphique couplé actif » ++++</i>) espacées de 150 mm</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1^{ère} coupe passant par l'aorte ascendante et l'artère pulmonaire • 2^e coupe placée au milieu de l'aorte descendante [ex =programmation : 1^{ère} placée à H70 et 2^e à F80/ isocentre à adapter] <p>FOV = 380 mm avec Ep = 6 mm Segment = 1 et nombre de phases = 128 TR = 8,08 ms ; TE = 2,27 ms ; angle de bascule = 20°</p>
DEBIT AORTIQUE AVEC MOUVEMENTS	<p>Demander au sujet de fermer les mains et battre des jambes en même temps pendant 2 min → augmentation de la fréquence cardiaque</p> <p>[contraste de phase] identique au 1^{er} « débit aortique » : 1 coupe perpendiculaire à l'aorte ascendante FOV = 340 mm avec Ep = 6 mm ; Venc ~ 150 cm/sec TR = 37,76 ms ; TE = 2,55 ms ; angle de bascule = 20°</p>

b. Travail d'optimisation de la séquence 4D Flow

Comme évoqué un peu plus haut, nous avons été confrontés à un problème technique en rapport avec la séquence *4D flow* : comment obtenir une qualité d'image suffisante pour notre analyse en un temps d'acquisition acceptable ? Comment ne pas dégrader la résolution spatiale au profit de la résolution temporelle ? C'est pourquoi, nous avons travaillé en amont de notre étude sur l'optimisation de cette séquence, grâce à la participation de quelques volontaires sains qui ne pouvaient pas être inclus dans COATRI.

Nous avons débuté nos explorations avec une première série de trois volontaires, pour lesquels nous avons fait varier le PAT et l'épaisseur de coupe. Le PAT est la technologie *Parallel Acquisition Technology* développée par Siemens, pour accélérer l'acquisition des images. Plus le PAT est élevé, plus les images sont acquises rapidement, mais moins les données de flux sont nettes.

Pour le volontaire n°1381, la première acquisition s'est faite en PAT 2 pour un temps de répétition (TR) de 46,65 ms, donnant des images très riches sur le plan informatif vis-à-vis du flux mais possiblement difficiles à interpréter. Le passage en PAT 3 a permis de diminuer le TR à 37,5 ms, perdant au passage quelques informations mais rendant les coupes plus lisibles. Le passage en PAT 4 (TR = 35 ms) semblait être acceptable mais de moins bonne exploitation potentielle qu'en PAT 3. Le volume des voxels a quelque peu changé au cours des trois essais passant de 3,5 x 2,4 x 2,5 mm puis à 3,4 x 2,4 x 2,5 mm et enfin à 3,4 x 2,4 x 2,0 mm.

Nous avons répété le même paramétrage en PAT 3 pour le volontaire n°1382 avec un bon résultat. Le passage en PAT 4 a permis une diminution du TR à 30 ms, rendant les images inexploitable.

Enfin, pour le volontaire n°1383, nous avons fait varier l'épaisseur des coupes et le PAT à nouveau, nous permettant d'établir les premières conclusions suivantes : pas de PAT supérieur à 6 ni d'épaisseur de coupe supérieure à 8 mm.

Dans une seconde série de trois patients, nous avons joué sur le choix des PAT (entre le 3 et le 4), la fréquence de la bande passante, qui permet d'améliorer la résolution temporelle en augmentant le nombre de phases utilisées, et l'épaisseur de coupe. Nous avons également fait varier le mode prospectif ou rétrospectif. En *gating ECG* prospectif, l'onde R sert à déclencher les acquisitions, qui seront ainsi toutes réalisées au même moment du cycle cardiaque. Le TR est donc

un multiple de la durée du cycle cardiaque (142). Ce *gating* est particulièrement adapté pour les fréquences cardiaques basses. En *gating ECG* rétrospectif, l'acquisition des données se fait en continue et permet de réordonner les images lors de leur reconstruction. De ce fait, on limite les artéfacts liés aux mouvements cardiaques et au flux sanguin. De plus, on peut imager l'ensemble du cycle cardiaque alors qu'il existe un temps mort en fin de diastole en *gating* prospectif (142).

Pour le volontaire n°1389, le PAT 3 prospectif a permis d'obtenir un TR de 40 ms et des images de bonne qualité après le post-traitement et la reconstruction. Le passage en PAT 4 avec une bande passante à 1000 Hz et une épaisseur de coupe à 5 mm, a donné des images floues avec une déformation majeure de l'aorte, sans parler de la perte de données. Nous avons réitéré les mêmes paramétrages mais en *gating* prospectif : le PAT 3 était de bonne qualité tandis que le PAT 4 a montré une nette déformation de l'aorte.

Pour le volontaire n°1390, nous avons choisi de faire varier le PAT (3 ou 4) et le *gating*. En PAT 3 prospectif, la segmentation a été facile à réaliser et les informations étaient riches. En PAT 3 rétrospectif, la qualité des images semblait être conservée avec un TR à 55,10 ms. En PAT 4 prospectif, le nombre d'images était important rendant le post-traitement en mode vidéo long et lent. Enfin, en PAT 4 rétrospectif, les images étaient floues, peu exploitables.

A l'issue de cette deuxième série de tests, nous avons pu arrêter les paramètres suivants :

- voxel de 3,0 x 3,0 x 3,0 mm, le consensus étant de 2,5 x 2,5 x 2,5 mm pour une étude de l'aorte seule contre 3,0 x 3,0 x 3,0 mm pour une acquisition cœur + gros vaisseaux ;
- le temps de répétition doit être compris entre 30 et 40 ms ;
- le nombre de périodes doit être compris entre 20 et 25 ;
- le PAT 3 est un bon compromis entre temps d'acquisition et qualité des images ;
- l'épaisseur de coupe ne doit pas excéder 3 mm.

A ce moment de notre travail d'optimisation, il restait à se positionner sur la majoration ou non de la bande passante de 496 Hz par défaut à 1000 Hz, ainsi que sur le choix en prospectif ou en rétrospectif.

Avec cette troisième série de volontaires, nous nous sommes davantage focalisés sur le temps d'acquisition demandé par la 4D Flow, et donc sur sa réduction raisonnable pour que l'ensemble du protocole COATRI soit réalisable en une heure de temps (obligation réglementaire). Pour le volontaire n°1392, nous avons conservé une bande passante par défaut et avons joué sur le PAT en prospectif dans un premier temps, passant de 10 minutes d'acquisition pour le PAT 3 à 13 min pour le PAT 2, ce qui s'est avéré trop long. Nous avons essayé de passer en « Phase Fournier Partiel 6/8 » permettant de réduire le temps d'acquisition mais générant du repliement sur la série, autrement dit des artefacts majeurs sur la reconstruction des images.

Nous avons répété l'opération avec le volontaire n°1393 : 10 minutes d'acquisition en PAT 3 prospectif donnant des images floues et une segmentation difficile ; 14 minutes en PAT 2 prospectif donnant des images de meilleure qualité ; 9 minutes en PAT 3 rétrospectif mais pour lequel la reconstruction n'a pas pu être possible.

Enfin, avec le volontaire n°1394, les temps d'acquisition étaient respectivement de 15 puis 16 et enfin 28 minutes, mettant en évidence l'importance d'une respiration peu ample. En effet, la *4D Flow* se cale sur l'amplitude de la respiration, et plus particulièrement sur une portion de cette amplitude pour faire l'acquisition des données, déterminée lors du repérage. Si le volontaire respire en dehors de cette zone, alors les données ne sont pas captées, ce qui allonge la durée d'acquisition de la séquence (ce qui ne fait pas nos affaires). En raison de cette restriction, nous avons consigné de briefer les volontaires de COATRI de la sorte : pas de mouvements respiratoires amples mais plutôt des mouvements de petite amplitudes voire associées à des pauses respiratoires.

Au final, nous avons retenu l'utilisation d'une séquence en *gating* rétrospectif avec un PAT à 2.

3. Méthodologie du post-traitement des IRM

a. Mesures des paramètres ventriculaires

i. Cœurs gauche et droit

Pour mesurer les différents volumes des ventricules gauche et droit, ainsi que la masse du ventricule gauche, nous avons utilisé le logiciel SuiteHEART® version 5.0.1 (NeoSoft, Pewaukee, USA). Tout d'abord, il faut déterminer les phases télésystolique et télédiastolique en vue petit axe. La phase télésystolique correspond à un ventricule contracté, offrant son plus faible volume interne, tandis que la phase télédiastolique est celle pour laquelle ce volume est le plus important (**figure 2-17**). Ensuite, le logiciel réalise sur les coupes petit axe de la séquence « PA TRUFI FCN CINE » un contourage semi-automatique, qui est apparu suffisamment reproductible lors de nos périodes de tests. Toutefois, il convient de vérifier voire de corriger les contours, uniquement en cas de franche anomalie afin de ne pas modifier la qualité des données. La **figure 2-18** présente une capture d'écran du logiciel SuiteHEART®.

Figure 2-17. Images IRM en coupes petit axe montrant la phase télésystolique (à gauche) et la phase télédiastolique (à droite) du ventricule gauche (images personnelles d'archives)

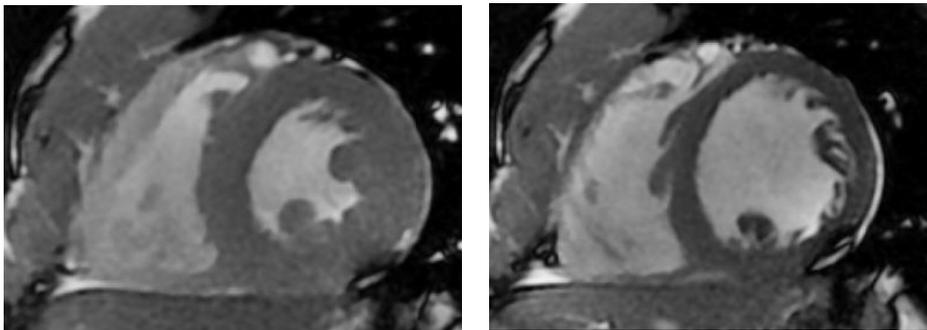
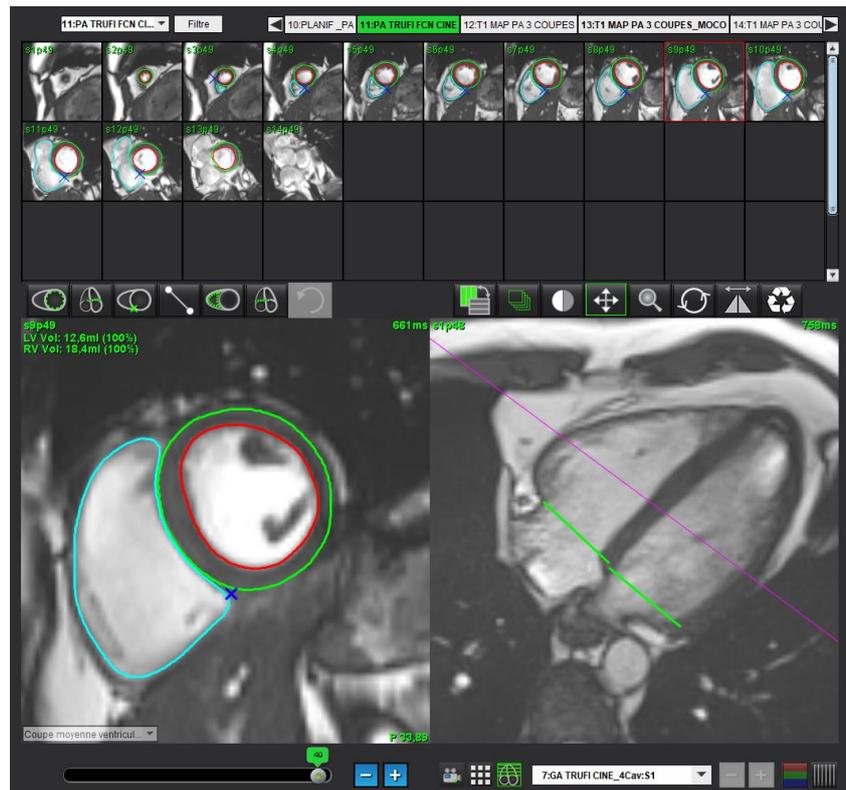


Figure 2-18. Capture d'écran partielle du logiciel SuiteHEART® pour la détermination des paramètres fonctionnels ventriculaires



Sur la partie inférieure de la figure, à gauche :

- Le contourage bleu ciel représente le contour interne de l'endocarde du ventricule droit.
- Le contourage rouge représente le contour interne de l'endocarde du ventricule gauche tandis que le contourage vert est associé à l'épicarde du ventricule gauche.

Sur la partie inférieure de la figure, à droite :

Les lignes vertes représentent les limites supérieures des ventricules au niveau des valves atrio-ventriculaires. Il est nécessaire parfois de les ajuster manuellement.

Les volumes sont ensuite calculés selon la méthode de Simpson qui consiste à additionner les surfaces contourées et à les multiplier par l'épaisseur de coupe :

- Pour obtenir les paramètres fonctionnels du ventricule droit (volumes et FEVG), on applique cette méthode aux surfaces contourées bleues ;
- Pour obtenir les paramètres fonctionnels du ventricule gauche (volumes et FEVG), on applique cette méthode aux surfaces contourées rouges ;
- Pour obtenir la masse du ventricule gauche, on applique tout d'abord cette méthode aux surfaces contourées rouges et vertes, puis on soustrait le volume rouge du volume vert. Ensuite, on multiplie le volume obtenu par la densité myocardique de 1,05 kg/m².

Bien entendu, ces calculs sont réalisés automatiquement par le logiciel et peuvent être exportés directement sous la forme d'un tableur Excel. Sachant que les volumes et le masse du VG sont fonction de la taille de l'individu, nous utiliserons des mesures indexées sur la surface corporelle de manière à pouvoir nous affranchir de ce paramètre anthropométrique lors de nos comparaisons.

ii. Paramètres composites

Dans notre analyse, nous avons choisi d'exploiter certains critères composites, calculés à partir des paramètres fonctionnels comme les chiffres de pression artérielle périphérique et de fréquence cardiaque mesurés dans l'IRM ainsi que les volumes ventriculaires issus du post-traitement. Nous avons retenu les paramètres suivants :

- Le *stroke volume* noté SV, qui résulte de la différence entre le volume télédiastolique (VTD) et le volume télésystolique (VTS). Il représente le volume éjecté à chaque contraction cardiaque et s'exprime en mL.
- L'index cardiaque noté IC, qui correspond au rapport du débit cardiaque par la surface corporelle en m². Il s'exprime en L/min/m² et permet de comparer le débit cardiaque de sujets de tailles différentes. Nous rappelons que le débit cardiaque se calcule en multipliant le VES par la fréquence cardiaque.
- Le *stroke work*, calculé par le produit du *stroke volume* par la pression artérielle moyenne périphérique. Il s'exprime en mL.mmHg et correspond à une estimation de la fonction ventriculaire.
- L'élastance ventriculaire, déterminée par le rapport de $(0,9 * PAS)$ avec PAS la pression artérielle systolique périphérique et du VES, d'après Sahlén et al. (78). L'élastance caractérise ici la capacité du ventricule à se déformer lorsqu'il est soumis à une contrainte de pression, et s'exprime en mmHg/mL.

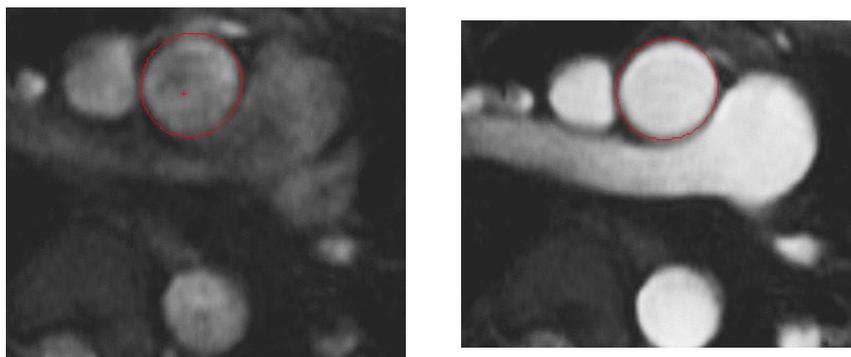
b. Mesures des paramètres vasculaires

i. Mesures des sections aortiques

Pour déterminer les paramètres vasculaires attendus, compliance et distensibilité aortiques notamment, nous avons besoin de déterminer les surfaces maximale et minimale de ce gros vaisseau. Pour cela, nous disposons des séquences « AX OBL AORTE TRUFI CINE » que nous avons traitées initialement avec le logiciel SuiteHEART®. Or les résultats obtenus n'étaient pas à la hauteur de nos espérances. En effet, nombreuses images faisaient état d'artefacts de flux, ce qui ne permettait pas d'obtenir des données valables et en quantité suffisante, pour espérer obtenir des résultats significatifs. Grâce à un contrat de partenariat, nous avons pu bénéficier du logiciel ArtFun® (Imageens, Paris) pour réaliser ces mesures.

Sur les séquences de type sus-cité, il faut indiquer au logiciel la région d'intérêt que nous souhaitons étudiée, en l'occurrence la section de l'aorte thoracique ascendante, voire de l'aorte thoracique descendante si la qualité d'image est suffisante. Dans un second temps, le logiciel va générer de manière semi-automatisée la dite section pour l'ensemble des phases du cycle cardiaque. Toutefois, il convient de vérifier voire de corriger les contours, uniquement en cas de franche anomalie afin de ne pas modifier la qualité des données. Enfin, le logiciel va déterminer de manière autonome les sections aortiques minimale correspondant à la diastole, et maximale correspondant à la systole (**figure 2-19**) ; puis va calculer la distensibilité aortique grâce aux mesures de pression pulsée centrale déterminées en tonométrie et que nous avons transmises au préalable.

Figure 2-19. Images IRM en coupes axiales de la surface – en rouge – de la racine aortique en diastole (à gauche) et en systole (à droite) (images personnelles d'archives)



ii. Paramètres composites

Dans notre analyse, nous avons choisi d'exploiter certains critères composites, calculés à partir des mesures de section aortique mais également de certains paramètres fonctionnels comme les chiffres de pression artérielle périphérique et de fréquence cardiaque mesurés dans l'IRM, ainsi que des mesures de pression artérielle centrale et de VOP. Nous avons retenu les paramètres suivants :

- La compliance aortique, qui se détermine selon la relation suivante :

$$\text{Compliance Aortique} = \frac{A_{\text{max}} - A_{\text{min}}}{\text{Pression Pulsée Centrale}}$$

avec A_{max} la section aortique maximale, et A_{min} la section aortique minimale. Elle s'exprime en cm^2/mmHg et représente la capacité de la paroi aortique à se distendre en fonction de la pression sanguine.

- La distensibilité aortique, qui peut se calculer de deux façons :

$$\text{Distensibilité Aortique} = \frac{A_{\text{max}} - A_{\text{min}}}{A_{\text{min}} \times \text{Pression Pulsée Centrale}}$$

Ou $Da = \left(\frac{3,57}{PWV}\right)^2$ avec PWV la vitesse de l'onde de pouls, déterminée en tonométrie d'aplanation.

La distensibilité aortique, qui s'exprime en mmHg^{-1} , reflète la variabilité relative de la lumière aortique sous l'influence de la pression pulsée centrale.

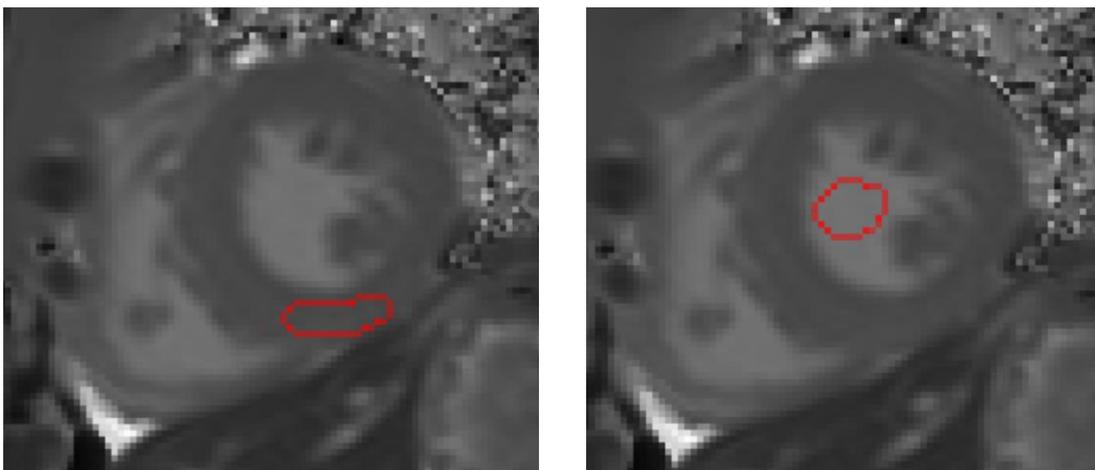
- L'élastance artérielle ou aortique dans notre cas, déterminée par le rapport de $(0,9 * \text{PAS})$ avec PAS la pression artérielle systolique périphérique et du SV, d'après Otsuki et al. (143). L'élastance caractérise ici la capacité de l'aorte à se déformer lorsqu'elle est soumise à une contrainte de pression venant du ventricule, et s'exprime en mmHg/mL .
- Le couplage ventriculo-aortique, qui est le rapport entre l'élastance artérielle et l'élastance ventriculaire (78). C'est un paramètre adimensionné qui caractérise l'efficacité de la pompe cardiaque.
- La compliance artérielle sous-entendue totale, qui résulte du rapport entre le *stroke volume* et la pression pulsée périphérique, définie par la différence PAS-PAD avec respectivement les pressions artérielles périphériques systolique et diastolique (116). Elle s'exprime en mL/mmHg et représente la capacité du système artériel total (central + périphérique) à s'adapter aux contraintes de pression.

- La résistance artérielle périphérique totale, issue du ratio entre la pression artérielle moyenne périphérique et le débit cardiaque. Exprimée en mmHg.min/L, elle caractérise la résistance à l'écoulement du flux sanguin au travers du réseau artériel total (central + périphérique).

c. Mapping T1

Dans notre protocole, nous nous sommes intéressés à plusieurs régions d'intérêt au niveau cardiaque et au niveau musculaire. Nous avons travaillé avec nos ingénieurs du IADI pour développer un *plug-in* utilisable sous Archimède®. Cet outil nous a permis de dessiner des régions d'intérêt (ROI) dans lesquelles serait calculé le T1 moyen. Au niveau cardiaque, nous nous sommes penchés sur l'étude du septum et de l'insertion du ventricule droit au niveau du septum interventriculaire (**figure 2-20**), deux zones où la fibrose myocardique peut se développer préférentiellement (61). Pour que nos comparaisons soient représentatives, nous nous sommes astreints à ce que les ROI soient tracées dans des zones de tissu homogène et que leurs surfaces soient comprises respectivement entre 115-130 et 55-70 pixels. Nous avons également dessiné une zone d'intérêt au sein de la lumière ventriculaire (**figure 2-20**), en faisant bien attention d'exclure les piliers, d'une surface comprise entre 55 et 70 pixels. Enfin, nous avons tracé deux autres ROI au sein des muscles rhomboïde et grand dorsal, d'une surface comprise entre 130 et 145 pixels.

Figure 2-20. Représentation de la région d'intérêt dans le septum interventriculaire au niveau de l'insertion du ventricule droit (à gauche), et au niveau de la lumière ventriculaire (à droite) dans le cadre des mesures de T1 (données personnelles)



V. Analyses statistiques

Les caractéristiques des volontaires sont décrites pour l'ensemble des participants dans les deux groupes et aux trois temps de l'étude. Les paramètres quantitatifs sont décrits par leurs moyennes \pm écart-types, ou médianes et écart interquartile selon leur normalité, ainsi que par les paramètres qualitatifs par leurs effectifs et pourcentages. La normalité des distributions a été vérifiée graphiquement par des histogrammes et par le test de Shapiro-Wilk. Les comparaisons de valeurs moyennes entre le groupe de triathlètes et le groupe de témoins ont été effectuées à l'aide du test de Student ou de Wilcoxon selon la normalité des données. Pour les comparaisons longitudinales (comparaisons deux à deux aux différents temps d'étude), les mêmes tests sur séries appariées ont été utilisés et le seuil de significativité a été ajusté par la méthode de Benjamini-Hochberg afin de tenir compte des comparaisons multiples. La comparaison des données qualitatives entre les deux groupes a été faite par le test du Chi deux ou le test exact de Fisher selon les données. Le seuil global de significativité alpha a été fixé à $p < 0,05$ en situation bilatérale. Le logiciel utilisé pour l'analyse statistique est le logiciel R version 4.0.3.

Pour résumer cette seconde partie

Au cours du protocole COATRI, nous souhaitons étudier en premier lieu la variation de la compliance aortique au cours de la saison sportive chez 34 triathlètes amateurs longue distance, comparativement à un groupe contrôle de 29 individus insuffisamment actifs. En parallèle, nous nous intéresserons également à la variation des paramètres fonctionnels cardiaques tout comme à l'entraînement de ces sportifs.

Pour cela, nous couplerons des mesures issues de deux tonomètres d'aplanation SphygmoCor® et PulsePen® à des données provenant du post-traitement d'IRM cardio-vasculaires pour lesquelles nous avons établi notre propre protocole. Ce dernier fera appel entre autres à des séquences de type bSSFP et de type contraste de phase. De ce fait, nous pourrions déterminer essentiellement des mesures de sections aortiques pour le calcul de la compliance, et de volumes ventriculaires pour l'étude du remodelage cardiaque. A cela s'ajouteront des paramètres composites d'ordre vasculaire et cardiaque utilisant des mesures de pression artérielle, pour compléter nos résultats.

En parallèle, nous recueillerons les données des agendas sportifs de nos triathlètes pour établir une étude descriptive de leur entraînement selon différentes modalités. Enfin, nous proposerons un monitoring de leur charge sportive selon la méthode des TRIMPS et ce, sur l'ensemble de la période de suivi.

Partie 3 : Résultats

I. Caractéristiques générales de l'étude et des populations étudiées

A. Données globales de l'étude COATRI

Le protocole de l'étude COATRI (COmpliance Aortique chez le TRIathlète) a été validé dans sa version finale le 17 novembre 2017. Le premier volontaire a été inclus le 1^{er} décembre 2017 tandis que le dernier l'a été le 20 avril 2018. La période d'inclusion a donc duré 5 mois environ. La durée de suivi de chaque volontaire s'est échelonnée entre 9,3 et 13,0 mois. Cette durée, variable, s'explique par le statut du volontaire – triathlète ou contrôle – et par la date de l'objectif sportif principal de la saison 2018 du triathlète, avec lequel était apparié son volontaire contrôle. Cette période de compétition s'est étalée de mai 2018 à octobre 2018. Enfin, la durée totale de l'étude comprenant la période d'inclusion et la période de suivi, a été de 15,4 mois, la dernière visite ayant été réalisée le 8 mars 2019. Les périodes au cours desquelles ont été réalisées les différentes visites et ce, en fonction du groupe d'étude, sont résumées dans le **tableau 3-1**.

Tableau 3-1. Périodes de réalisation des différentes visites en fonction du groupe d'étude

	Triathlètes	Témoins
Visite n°1	Du 1 ^{er} décembre 2017 Au 9 février 2018	Du 26 janvier 2018 Au 20 avril 2018
Visite n°2	Du 4 mai 2018 Au 28 septembre 2018	Du 11 mai 2018 Au 21 septembre 2018
Visite n°3	Du 9 novembre 2018 Au 18 janvier 2019	Du 09 novembre 2018 Au 08 mars 2019

34 triathlètes et 29 témoins ont été inclus sur cette période, pour un objectif de 35 volontaires dans chaque groupe. Ce calcul d'effectifs théoriques a été réalisé en fonction des résultats de l'étude pilote réalisée par le Dr DUPONT et le Pr MANDRY en 2014, dans le cadre des travaux de Master 2 de la principale intéressée (1). Un triathlète a quitté l'étude avant la seconde visite, jugeant finalement le protocole trop astreignant. Un témoin n'a pas voulu poursuivre à l'issue de la première visite, ayant eu quelques difficultés à supporter l'ambiance particulière de l'examen IRM. Enfin, deux autres témoins n'ont pas pu réaliser la troisième visite pour une question d'emploi du temps. Au total, ce sont 183 visites qui ont été conduites, soit autant d'IRM et de tonométries d'aplanation. Les délais entre les différentes visites et selon les deux groupes d'étude sont résumés dans le **tableau 3-2**. On constate que les délais entre deux visites sont significativement différents entre les deux groupes d'étude.

Tableau 3-2. Durées moyennes, minimales et maximales entre deux visites pour chaque groupe d'étude

	Triathlètes	Témoins	p-value
V1-V2			
Moyenne	6,5 ± 1,5	4,3 ± 1,3	< 0,001*
Minimum	3,0	2,1	
Maximum	8,7	6,7	
V2-V3			
Moyenne	4,5 ± 1,6	5,6 ± 1,9	< 0,001*
Minimum	2,6	2,3	
Maximum	7,2	9,0	
V1-V3			
Moyenne	11,0 ± 1,1	9,5 ± 1,5	< 0,001*
Minimum	7,6	4,6	
Maximum	12,8	11,2	
Les durées sont indiquées en mois. Les données sont exprimées sous la forme moyenne ± écart-type. Valeur de p-value significative si < 0,05 et notée *			

Les caractéristiques anthropométriques des deux populations lors de la période de suivi sont résumées dans le **tableau 3-3a**. On remarque que les triathlètes ont un poids significativement plus élevé que les contrôles et ce, pour les trois visites (V1 : 73,7 ± 7,1 vs 68,9 ± 8,5 kg, $p = 0,019$; V2 : 73,4 ± 7,9 vs 68,9 ± 8,4 kg, $p = 0,037$; V3 : 74,9 ± 8,1 vs 69,7 ± 8,4 kg, $p = 0,019$). La surface corporelle

(BSA) suit les mêmes observations (V1 : $1,92 \pm 0,12$ vs $1,85 \pm 0,14$ m², $p = 0,025$; V2 : $1,92 \pm 0,12$ vs $1,86 \pm 0,14$ m², $p = 0,046$; V3 : $1,94 \pm 0,12$ vs $1,85 \pm 0,14$ m², $p = 0,027$). Quant à l'indice de masse corporelle, il est significativement plus élevé dans le groupe Tri pour V1 (22,4 (21,4 ; 24,5) kg/m², $p = 0,013$) et V3 (22,5 (21,4 ; 24,4) vs 21,4 (20,7 ; 23,3) kg/m², $p = 0,027$). Il n'y a pas de différence significative concernant l'âge et la taille des volontaires.

Tableau 3-3a. Comparaison des caractéristiques anthropométriques entre les deux groupes d'étude et en fonction du numéro de visite

	Groupe Tri	Groupe Ctrl	p-value
Visite n°1			
Age	33,5 (26,3 ; 37,8)	32,0 (27,0 ; 34,0)	0,320
Poids	73,7 ± 7,1	68,9 ± 8,5	0,019*
Taille	1,80 (1,77 ; 1,84)	1,78 (1,75 ; 1,81)	0,275
IMC	22,4 (21,4 ; 24,5)	21,2 (19,9 ; 22,5)	0,013*
BSA	1,92 ± 0,12	1,85 ± 0,14	0,025*
Visite n°2			
Age	34,0 (27,0 ; 38,0)	34,5 (27,0 ; 35,5)	0,306
Poids	73,4 ± 7,9	68,9 ± 8,4	0,037*
Taille	1,80 (1,77 ; 1,84)	1,78 (1,75 ; 1,81)	0,207
IMC	22,5 ± 2,0	21,5 ± 1,9	0,055
BSA	1,92 ± 0,12	1,86 ± 0,14	0,046*
Visite n°3			
Age	34,0 (27,0 ; 38,0)	33,0 (28,0 ; 35,0)	0,404
Poids	74,9 ± 8,1	69,7 ± 8,4	0,019*
Taille	1,80 ± 0,06	1,78 ± 6,9	0,298
IMC	22,5 (21,4 ; 24,4)	21,4 (20,7 ; 23,3)	0,033*
BSA	1,94 ± 0,12	1,85 ± 0,14	0,027*
Poids : en kg ; taille : en m ; âge : en années ; IMC = Indice de Masse Corporelle : en kg/m ² ; BSA = Body Surface Area = surface corporelle : en m ² Les données sont exprimées sous la forme moyenne ± écart-type ou sous la forme médiane (IQR). Valeur significative si $p < 0,05$ et notée *			

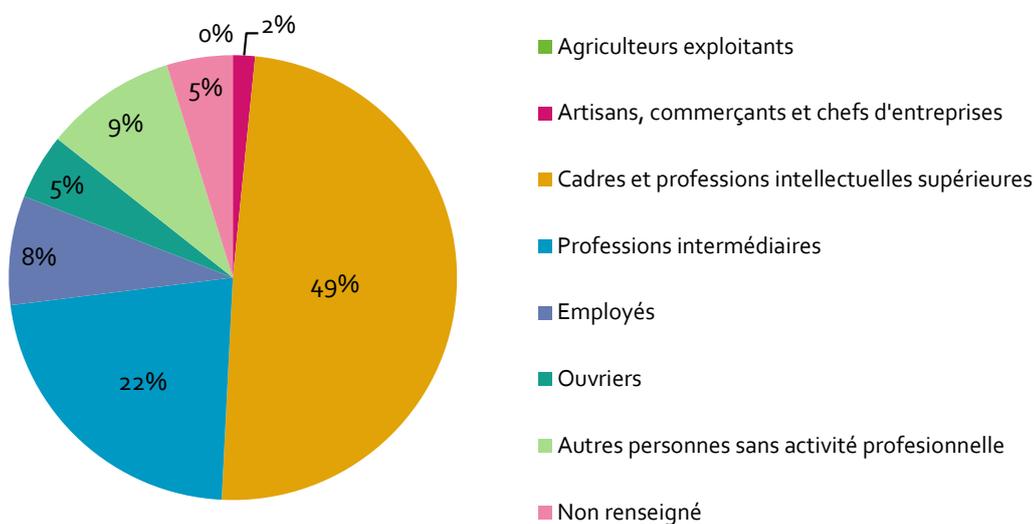
Dans un second temps, nous avons réalisé une comparaison longitudinale de ces mêmes paramètres (**tableau 3-3b**) et avons constaté qu'il n'existait pas de différence significative au cours de la période de suivi dans nos deux groupes.

Tableau 3-3b. Comparaison longitudinale des caractéristiques anthropométriques en fonction du groupe d'étude

	Visite n°1	Visite n°2	Visite n°3	<i>p</i> -value
Groupe Triathlètes				
Age	33,5 (26,3 ; 37,8)	34,0 (27,0 ; 38,0)	34,0 (27,0 ; 38,0)	0,746
Poids	73,7 ± 7,1	73,4 ± 7,9	74,9 ± 8,1	0,685
Taille	1,80 (1,77 ; 1,84)	1,80 (1,78 ; 1,84)	1,80 (1,78 ; 1,84)	0,988
IMC	22,4 (21,4 ; 24,5)	21,8 (21,1 ; 23,7)	22,5 (21,4 ; 24,4)	0,714
BSA	1,92 ± 0,12	1,92 ± 0,12	1,94 ± 0,12	0,799
Groupe Contrôles				
Age	32,0 (27,0 ; 34,0)	32,5 (27,0 ; 35,5)	33,0 (28,0 ; 35,0)	0,711
Poids	68,9 ± 8,5	68,9 ± 8,4	69,7 ± 8,4	0,926
Taille	1,78 (1,75 ; 1,81)	1,78 (1,75 ; 1,81)	1,78 (1,74 ; 1,82)	0,995
IMC	21,5 ± 1,9	21,5 ± 1,9	21,8 ± 1,9	0,847
BSA	1,85 ± 0,14	1,85 ± 0,14	1,86 ± 0,14	0,953
Poids : en kg ; taille : en m ; âge : en années ; IMC = Indice de Masse Corporelle : en kg/m ² ; BSA = Body Surface Area = surface corporelle : en m ² Les données sont exprimées sous la forme moyenne ± écart-type ou sous la forme médiane (IQR). Valeur significative si <i>p</i> < 0,05 et notée *				

Enfin, nous nous sommes intéressés à la catégorie socio-professionnelle de notre population d'étude. Sur 63 volontaires, trois d'entre eux (population contrôle) n'ont pas souhaité indiquer leur profession. La **figure 3-1** montre que notre population ne compte pas d'agriculteurs (catégorie 1 d'après l'INSEE) et que près de la moitié des volontaires fait partie de la catégorie des « cadres et professions intellectuelles supérieures ». Les « autres personnes sans activité professionnelle » sont des étudiants de l'enseignement supérieur.

Figure 3-1. Répartition en pourcentage des différentes catégories socio-professionnelles dans notre population générale



Pour davantage de lisibilité dans les figures qui vont suivre, nous proposons la correspondance suivante (**tableau 3-4**) d'après la codification officielle de l'INSEE.

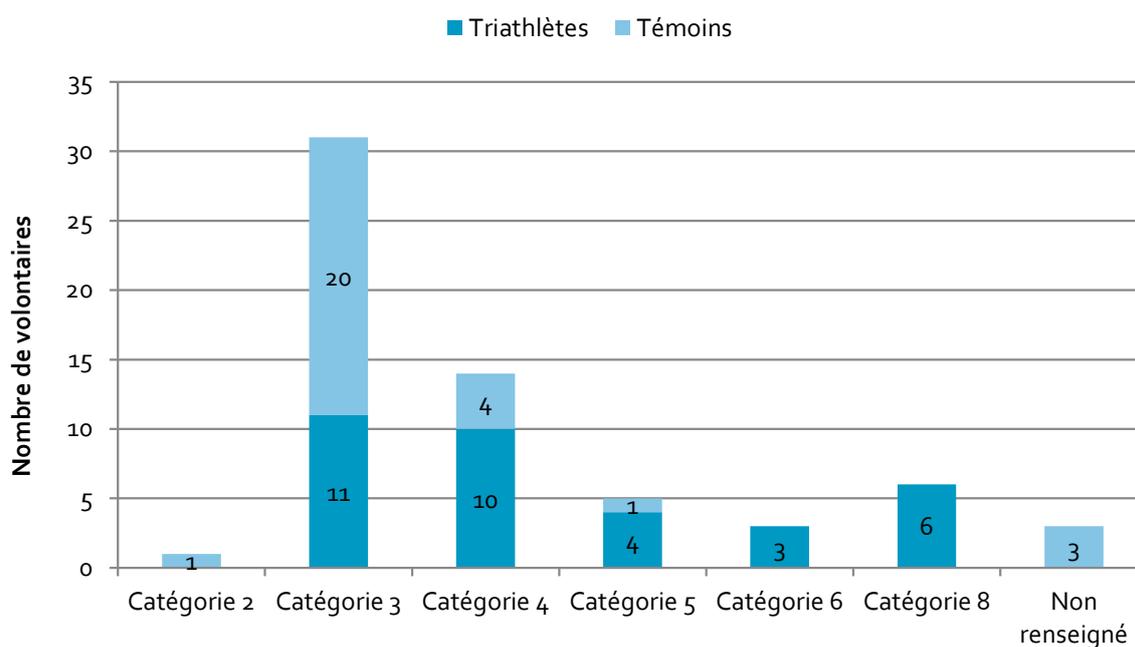
Tableau 3-4. Tableau de correspondance entre la catégorie socio-professionnelle et sa référence chiffrée

Catégorie socio-professionnelle	Catégorie chiffrée
Agriculteurs exploitants	Catégorie 1
Artisans, commerçants et chefs d'entreprise	Catégorie 2
Cadres et professions intellectuelles supérieures	Catégorie 3
Professions intermédiaires	Catégorie 4
Employés	Catégorie 5
Ouvriers	Catégorie 6
Autres personnes sans activité professionnelle	Catégorie 8

La **figure 3-2** représente la répartition du nombre de volontaires par catégorie socio-professionnelle, et en fonction du groupe d'appartenance (triathlètes ou témoins). La catégorie 3 comporte environ un tiers de triathlètes pour deux tiers de témoins.

Figure 3-2. Représentation du nombre de volontaires par catégorie socio-professionnelle et en fonction du groupe d'appartenance

Les catégories font référence au tableau de correspondance précédent (tableau 3-4).



B. Analyse des questionnaires de vie sportive

*Cette partie a fait l'objet d'une présentation spécifique sous la forme d'une communication orale affichée et présentée par Camille HUYNH, étudiante dans le cadre d'un Stage d'Initiation à la Recherche, lors du 12^e congrès commun Société Française de Médecine de l'Exercice et du Sport (SFMES) – Société Française de Traumatologie du Sport (SFTS) en septembre 2019 à Reims (51). Le poster, intitulé « Etude comparative de la pratique sportive débutée dans l'enfance d'une population de triathlètes adultes amateurs longue distance par rapport à sa population témoin appariée sur le sexe et l'âge » et présenté en annexe (**annexe n°3**), a reçu le premier prix de la SFMES dans la catégorie Communication orale affichée.*

Nous nous sommes donc interrogés sur la pratique sportive ancienne ou encore actuelle de nos volontaires. Pour cela, nous avons analysé les questionnaires de vie sportive comme décrit dans la partie II.

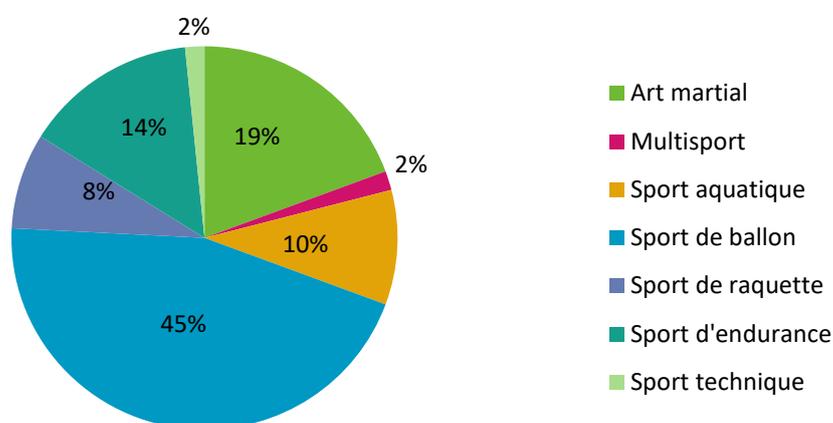
1. Analyse de la pratique sportive durant l'enfance et l'adolescence pour tous les volontaires

Dans cette partie et seulement pour les triathlètes, nous avons volontairement exclu la pratique du triathlon débutée dans l'enfance et/ou l'adolescence, qui sera abordée ultérieurement dans un paragraphe dédié. Le **tableau 3-5** recense les sports qui ont été mentionnés par 62 volontaires en fonction du type de pratique, en tant que premier sport débuté dans l'enfance. La **figure 3-3** montre donc un aperçu du premier sport expérimenté dans l'enfance en fonction du type de pratique, quel que soit le groupe d'appartenance. On constate que près de la moitié des volontaires a débuté sa pratique sportive dans l'enfance par un sport de ballon.

Tableau 3-5. Recensement des sports pratiqués par l'ensemble des volontaires en tant que premier sport débuté dans l'enfance

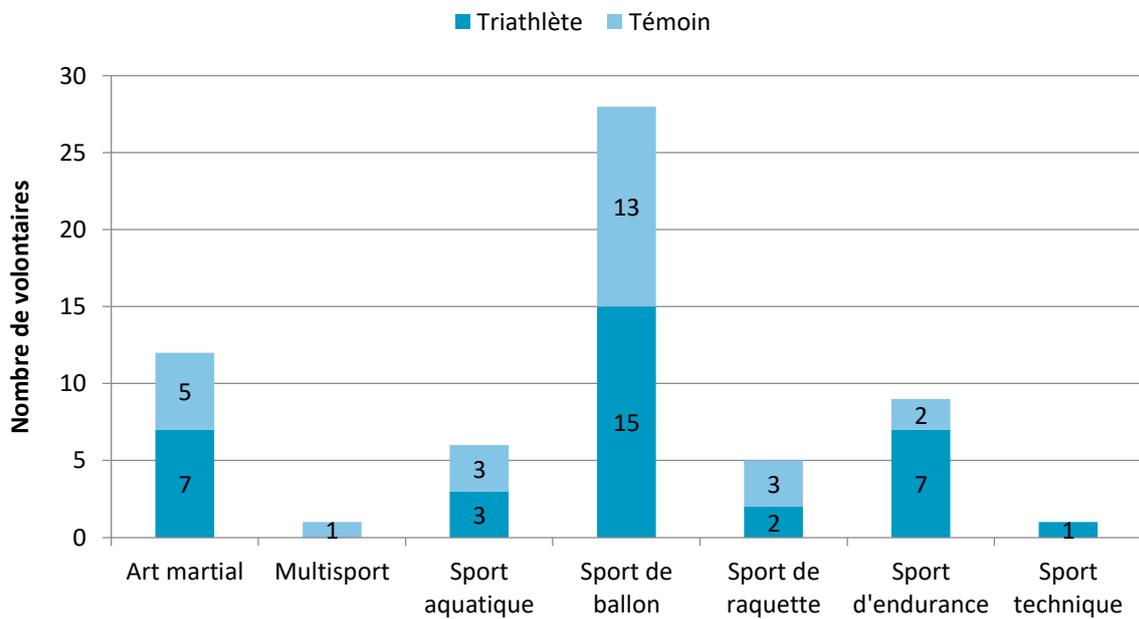
Type de pratique	Sport pratiqué
Art martial	Judo, karaté
Multisport	UNSS (sport scolaire)
Sport aquatique	Natation, plongée, waterpolo
Sport de ballon	Basketball, football, handball, volleyball
Sport de raquette	Tennis
Sport d'endurance	Athlétisme, course à pied, cyclisme sur route, marche athlétique, VTT
Sport technique	Escrime

Figure 3-3. Répartition en pourcentage du premier sport débuté dans l'enfance en fonction du type de pratique



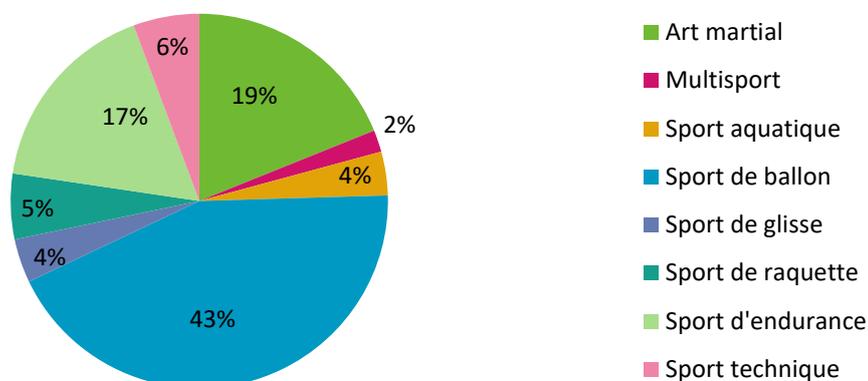
La **figure 3-4** représente le nombre de volontaires qui ont débuté leur pratique sportive dans l'enfance dans l'une des grandes catégories de sport présentées ci-dessus et ce, en fonction de leur groupe d'appartenance. Dans chacun des deux groupes, les volontaires ont débuté majoritairement leur pratique sportive dans l'enfance par un sport de ballon.

Figure 3-4. Représentation du nombre de volontaires en fonction du premier sport pratiqué dans l'enfance et du groupe d'appartenance



Dans un second temps, nous avons voulu savoir quel type de sport avait été majoritairement pratiqué durant l'enfance et/ou l'adolescence (au moins deux ans) jusqu'à l'âge de 18 ans. Nous avons conservé 54 éléments de réponse, dont la répartition en pourcentage est résumée dans la **figure 3-5**. Une fois encore, on constate que les volontaires ont majoritairement pratiqué un sport de ballon pour lequel la durée de pratique dans l'enfance et/ou l'adolescence a été la plus importante.

Figure 3-5. Répartition en pourcentage du sport le plus longtemps pratiqué dans l'enfance et/ou l'adolescence en fonction du type de pratique



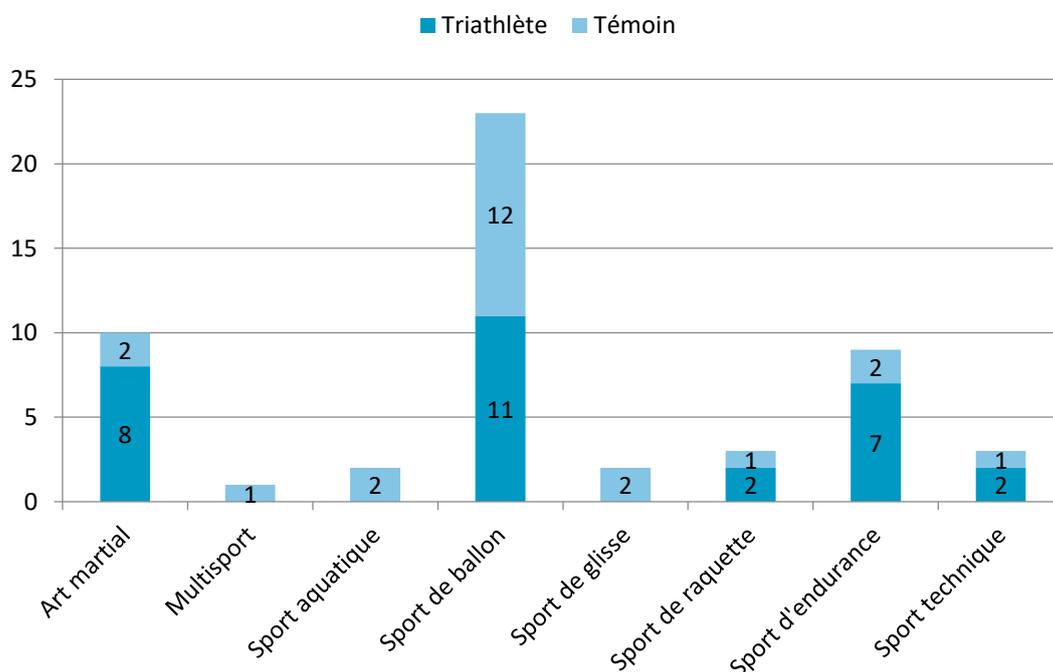
Le **tableau 3-6** recense les sports qui ont été mentionnés par les 54 volontaires en fonction du type de pratique, en tant que sport le plus longtemps pratiqué dans l'enfance et/ou l'adolescence.

Tableau 3-6. Recensement des sports pratiqués par l'ensemble des volontaires en tant que sport le plus longtemps pratiqué dans l'enfance et/ou l'adolescence

Type de pratique	Sport pratiqué
Art martial	Judo, karaté
Multisport	UNSS (sport scolaire)
Sport aquatique	Natation
Sport de ballon	Basketball, football, handball, volleyball
Sport de glisse	Ski (alpin), windsurf
Sport de raquette	Badminton, tennis
Sport d'endurance	Athlétisme, course à pied, cyclisme sur route, marche athlétique
Sport technique	Escrime, skateboard

La **figure 3-6** représente le nombre de volontaires qui a eu sa plus longue pratique sportive dans l'enfance et/ou l'adolescence pour un sport faisant partie de l'une des grandes catégories présentées ci-dessus et ce, en fonction de son groupe d'appartenance. Dans chacun des deux groupes d'appartenance, les volontaires ont le plus longuement pratiqué un sport de ballon durant leur enfance et/ou leur adolescence.

Figure 3-6. Représentation du nombre de volontaires en fonction du sport le plus longtemps pratiqué dans l'enfance et/ou l'adolescence et du groupe d'appartenance



Après avoir étudié de manière qualitative la pratique sportive dans l'enfance et l'adolescence de tous nos volontaires, nous nous sommes intéressés au versant quantitatif de cette même pratique. Les résultats sont présentés dans le **tableau 3-7**. On constate que les témoins ont débuté leur pratique sportive plus tardivement dans l'enfance (8,50 ans, [7,00 ; 10,00] vs 7,00 ans, [6,00 ; 10,00] ; $p < 0,001$). Tous les indicateurs – durée de la pratique, volume hebdomadaire, nombre d'unités métaboliques consommées par semaine ... – sont significativement moins élevés dans le groupe témoins par rapport au groupe triathlètes ($p < 0,001$). On remarque aussi que la durée de pratique en compétition est nettement inférieure dans le groupe témoins (3,5 ans, [0,00 ; 6,25]) que

dans le groupe triathlètes (10 ans, [6,00 ; 11,00]) durant l'enfance et l'adolescence. Enfin, le nombre d'heures d'entraînement cumulées durant cette même période est doublé dans le groupe triathlètes (1578,5 heures, [728,00 ; 2464,00]) par rapport au groupe témoins (700 heures, [262,50 ; 1190,00]).

Tableau 3-7. Comparaison quantitative de la pratique sportive dans l'enfance et l'adolescence entre les triathlètes et les témoins

Paramètres	Triathlètes (n= 34)	Témoins (n = 29)	p-value
Age de début (en années)	7,00 (6,00 ; 10,00)	8,50 (7,00 ; 10,00)	< 0,001*
Durée (en années) :			
- Pratique sportive	11,00 (8,00 ; 12,00)	8,00 (5,00 ; 9,00)	< 0,001*
- Pratique de compétition	10,00 (6,00 ; 11,00)	3,50 (0,00 ; 6,25)	< 0,001*
Volume hebdo. (en h/semaine)	4,00 (2,80 ; 5,70)	2,00 (2,00 ; 4,25)	< 0,001*
MET/semaine	34,70 (26,60 ; 50,00)	19,90 (14,00 ; 30,30)	< 0,001*
Dans l'enfance :			
- Heures cumulées	1578,50 (728,00 ; 2464,00)	700,00 (262,50 ; 1190,00)	< 0,001*
- MET cumulées	11760,00 (7448,00 ; 22613,50)	5964,00 (2712,50 ; 7689,50)	< 0,001*
Volume hebdo. : volume hebdomadaire ; MET = unité métabolique Les données sont exprimées sous la forme médiane (IQR). Valeur significative si $p < 0,05$ et notée *			

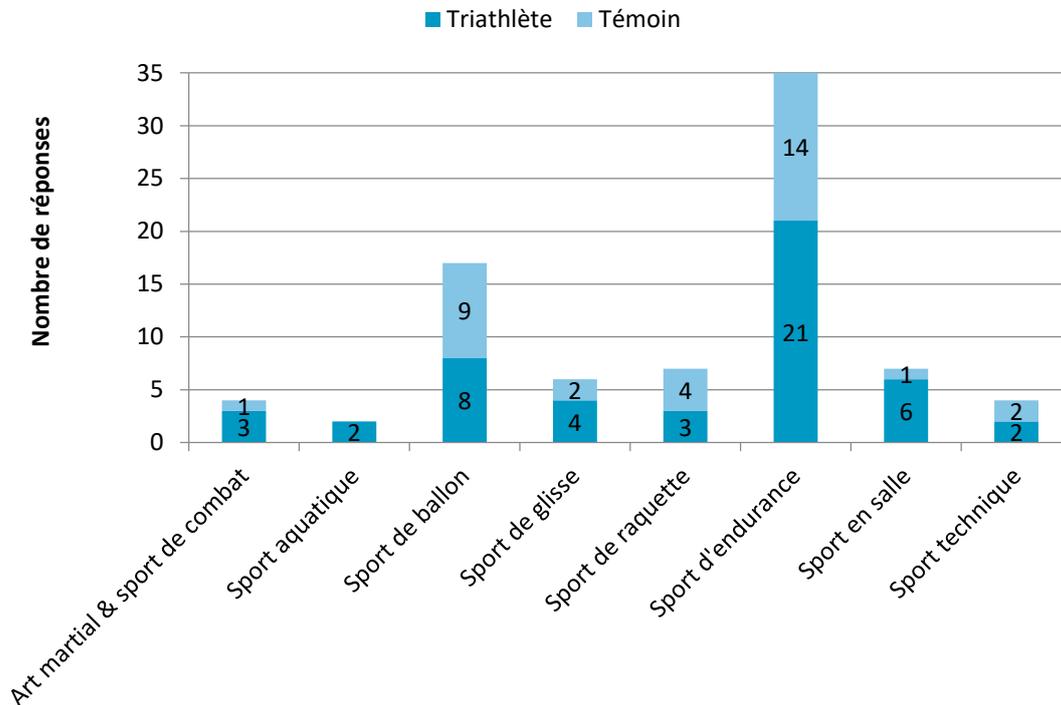
2. Analyse de la pratique sportive durant l'âge adulte pour tous les volontaires

Dans cette partie, nous nous intéressons aux sports pratiqués à l'âge adulte, donc à partir de l'âge de 19 ans. Nous avons recensé tous les sports pratiqués pendant au moins deux ans, hors triathlon, pour tous les volontaires, soit un total de 82 réponses (**tableau 3-8**). La **figure 3-7** représente quant à elle la répartition de ces réponses en fonction du groupe d'appartenance, triathlète ou témoin. On constate que les triathlètes comme les témoins pratiquent ou ont pratiqué en majorité au moins un sport d'endurance.

Tableau 3-8. Recensement des sports pratiqués par l'ensemble des volontaires pendant au moins deux ans à l'âge adulte

Type de pratique	Sport pratiqué
Art martial & sport de combat	Aïkido, boxe, judo, karaté
Sport aquatique	Natation, plongée
Sport de ballon	Basketball, football, handball, volleyball
Sport de glisse	Hockey, roller, ski de fond, ski nordique, windsurf
Sport de raquette	Badminton, squash, tennis, tennis de table
Sport d'endurance	Athlétisme, course à pied, cyclisme sur route, marche athlétique, raids multisports, trail, VTT
Sport en salle	Crossfit, fitness, musculation
Sport technique	Escalade, skateboard

Figure 3-7. Représentation des 82 réponses retenues pour les sports pratiqués pendant deux ans au moins à l'âge adulte (hors triathlon), en fonction du groupe d'appartenance



Après avoir étudié de manière qualitative la pratique sportive à l'âge adulte de tous nos volontaires, nous nous sommes intéressés au versant quantitatif de cette même pratique. 89 % des triathlètes pratiquaient une activité sportive à 19 ans contre 62 % des témoins. Les autres résultats sont présentés dans le **tableau 3-9**. On constate que la durée de pratique sportive à l'âge adulte est significativement plus élevée dans le groupe Tri que dans le groupe Ctrl (6,00 [2,00 ; 14,00] vs 4,00 [1,00 ; 7,00] années, $p = 0,008$). Tous les autres indicateurs – volume hebdomadaire, dépense énergétique en MET/semaine, heures et MET cumulés à l'âge adulte et sur une vie – sont significativement moins élevés dans le groupe témoins par rapport au groupe triathlètes ($p < 0,001$). On note qu'aucun de nos témoins pratiquait un sport en compétition. Nous avons calculé que nos athlètes s'étaient entraînés 1987,20 heures chacun (IQR : 368,00 ; 3532,80) environ à l'âge adulte, soit près de 83 jours en continu, tandis que nos témoins ne comptabilisaient que 391 heures en moyenne (IQR : 207,00 ; 694,60), soit 16,5 jours en continu ($p < 0,001$). Pour finir et hors triathlon, nos triathlètes ont accumulé 6220,20 heures d'entraînement chacun (IQR : 3681,20 ; 8708,20) soit 259 jours d'entraînement en continu, sur l'ensemble de la période enfance-adolescence – vie adulte, contre 1116,00 heures (IQR : 552,00 ; 1775,60) soit 46,5 jours en continu pour un témoin.

Tableau 3-9. Comparaison quantitative de la pratique sportive à l'âge adulte entre les triathlètes et les témoins (hors triathlon)

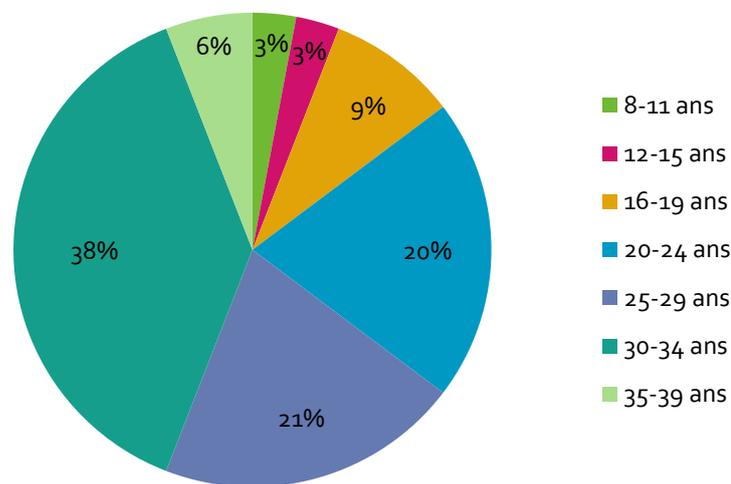
Paramètres	Triathlètes (n= 34)	Témoins (n = 29)	p-value
Durée (en années) :			
– Pratique sportive	6,00 (2,00 ; 14,00)	4,00 (1,00 ; 7,00)	0,008*
– Pratique de compétition	6,00 (0,00 ; 11,00)	0,00 (0,00 ; 3,25)	< 0,001*
Volume hebdo. (en h/semaine)	4,90 (2,15 ; 8,00)	2,15 (1,00 ; 3,08)	< 0,001*
MET/semaine	44,00 (16,42 ; 69,17)	12,50 (8,80 ; 26,50)	< 0,001*
A l'âge adulte :			
– Heures cumulées	1987,20 (368,00 ; 3532,80)	391,00 (207,00 ; 694,60)	< 0,001*
– MET cumulés	13993,20 (2760,00 ; 29348,00)	2341,40 (1493,85 ; 5278,50)	< 0,001*
Sur une vie :			
– Heures cumulées	6220,20 (3681,20 ; 8708,20)	1116,00 (552,00 ; 1775,60)	< 0,001*
– MET cumulés	53766,00 (35735,20 ; 76899,20)	8086,00 (4952,80 ; 13100,00)	< 0,001*
Volume hebdo. : volume hebdomadaire ; MET = unité métabolique Les données sont exprimées sous la forme médiane (IQR). Valeur significative si $p < 0,05$ et notée *			

Pour finir, nous nous sommes également intéressés à la raison de l'arrêt de la pratique sportive chez nos témoins. Au moment de l'inclusion et parmi nos 29 sujets contrôle, quatre poursuivaient une activité physique régulière (14 %) mais insuffisante selon les recommandations de l'OMS, tandis que 23 déclaraient ne plus faire de sport (79 %). L'âge moyen à l'arrêt du sport était de $23,5 \pm 6,0$ ans. Quinze personnes soit 65 % disaient manquer de temps pour pratiquer un sport régulièrement, que ce soit pour des raisons personnelles (déménagement, vie de famille) ou professionnelles. Trois reconnaissaient ne pas pratiquer par manque d'intérêt (13 %) tandis que trois autres incriminaient leurs études (13 %). Enfin, deux volontaires étaient sans activité sportive en raison de problème de santé (9 %).

3. Analyse de la pratique du triathlon dans le groupe triathlètes

Dans ce paragraphe, nous abordons plus spécifiquement la pratique du triathlon chez nos triathlètes et ce, quel que soit l'âge de début de leur pratique, dont la représentation est illustrée par la **figure 3-8**. On constate qu'un peu plus d'un tiers de notre effectif a débuté la pratique du triathlon après l'âge de 30 ans. Seulement 10 % de nos volontaires ont débuté ce sport dans l'enfance et/ou l'adolescence.

Figure 3-8. Répartition en pourcentage des triathlètes en fonction de leur âge de début de la pratique du triathlon



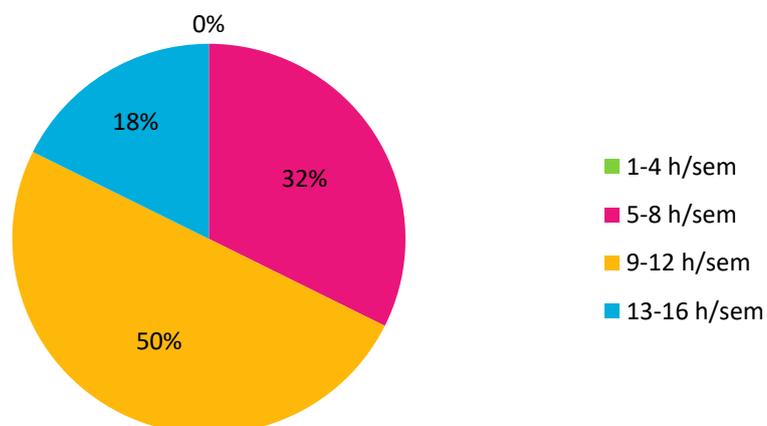
Les différentes caractéristiques quantitatives de la pratique du triathlon chez nos volontaires et ce, depuis leurs débuts dans la discipline, sont résumées dans le **tableau 3-10**. A l'échelle de leur vie, nos triathlètes se sont entraînés en moyenne 6852 ± 4290 heures et ont dépensé pas moins de $63\,765 \pm 41\,411$ MET, ce qui est plus élevé par rapport à nos témoins sur la même période, respectivement 1622 ± 1709 heures et $10\,616 \pm 9007$ MET.

Tableau 3-10. Caractéristiques quantitatives de la pratique du triathlon chez les triathlètes, depuis le début de leur pratique de la discipline jusqu'en 2017 inclus

	Triathlètes
Age de début	26,2 ± 6,2
Durée de la pratique	6,6 ± 4,5
Volume hebdomadaire	8,4 ± 2,2
MET/semaine	84,3 ± 22,0
Années de compétition	6,4 ± 3,9
Heures cumulées sur la durée de la pratique	2766 ± 2660
MET cumulés sur la durée de la pratique	27655 ± 26602
Age et durées : en années ; volume hebdomadaire : en heures par semaine ; MET = unité métabolique ; heures et MET cumulés sur la durée de la pratique, en années Les données sont exprimées en moyenne ± écart-type.	

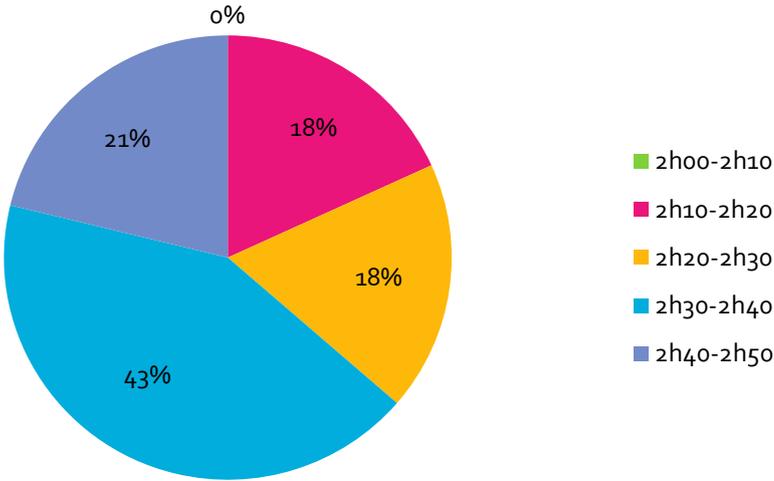
D'après le tableau ci-dessus, et pour l'ensemble de la pratique de nos triathlètes, la durée moyenne d'entraînement par semaine est de $8,4 \pm 2,2$ heures par semaine. Toutefois, pour l'année 2018, nos volontaires ont déclaré qu'ils allaient s'entraîner en moyenne $10,5 \pm 2,4$ heures par semaine, soit environ 2 heures de plus. La **figure 3-9** représente la répartition en pourcentage de nos athlètes en fonction du volume horaire hebdomadaire déclaré pour l'année 2017 : 50 % de notre effectif s'entraînaient entre 9 et 12 heures par semaine.

Figure 3-9. Répartition en pourcentage des triathlètes en fonction du volume horaire hebdomadaire d'entraînement déclaré pour l'année 2017



Enfin, la **figure 3-10** montre la répartition en pourcentage de nos athlètes en fonction de leur performance moyenne sur distance M (1500 m de natation, 40 km de vélo et 10 km de course à pied). La majorité de nos athlètes terminent ce type d'épreuve avec un temps compris entre 2h30 et 2h40.

Figure 3-10. Répartition en pourcentage des triathlètes en fonction de leur performance moyenne sur distance M



II. Analyse des agendas d'entraînement des triathlètes

29 triathlètes ont fourni leur agenda d'entraînement à la fin de l'étude, que ce soit en version papier ou numérique. Parmi eux, neuf volontaires ont donné une évaluation quotidienne de leur entraînement, alors que la demande avait été formulée pour une semaine représentative par mois pour éviter ainsi une perte de motivation au fil du temps. Seulement quatre agendas parmi ceux-ci n'ont pas pu être exploités, la raison principale étant l'absence d'évaluation de la perception de l'effort (RPE). Finalement, ce sont 24 agendas qui ont pu être exploités.

Ce suivi de l'entraînement des athlètes a été réalisé sur un total de 16 mois. Pour chaque mois, chaque athlète a noté dans son agenda l'ensemble des séances réalisées sur LA semaine de son choix. Cette dernière devait représenter au mieux la charge d'entraînement moyenne sur le mois en cours. Par exemple, l'athlète ne devait pas prendre pour référence sa semaine de récupération. Toutefois, si l'athlète était en repos sur tout le mois, il devait mentionner une semaine sans entraînement dans son agenda.

A. Analyse quantitative de l'entraînement

1. Analyse globale

Sur l'ensemble des 16 mois de suivi, nous disposons d'un nombre cumulé de 1687 séances, soit une durée de 140 828 minutes ou 2347 heures et 8 minutes cumulées de pratique sportive. La répartition de ces données en fonction de la discipline pratiquée est indiquée dans le **tableau 3-11**. On constate que vélo et course à pied représentent chacun un peu plus d'un tiers du nombre de séances. Parmi les autres activités, on compte par exemple la randonnée, le ski, le roller, le squash ou encore la compétition quelle que soit la discipline, sans oublier la préparation physique globale. Cette dernière fait référence aux séances d'étirements, de proprioception ou encore de renforcement musculaire par exemple. Par ailleurs, la course dite de référence n'est pas incluse dans ces séances de compétition, séances pour lesquelles un paragraphe sera dédié.

Tableau 3-11. Répartition du nombre de séances rapportées par secteur d'activité, y compris en pourcentage du nombre total, au cours de la période de suivi

	Natation	Vélo	Course à Pied	Autre	Total
Nombre de séances	349	597	575	166	1687
Pourcentage	21 %	35 %	34 %	10 %	100 %

La **figure 3-11a-b** représente le nombre de séances étudiées sur l'ensemble de la période de suivi, en fonction du type d'activité. La natation en piscine ainsi que le vélo et la course à pied sur route sont de loin les activités prédominantes en termes de nombre de séances réalisées.

Figure 3-11a. Représentation du nombre total de séances d'entraînement rapportées, en fonction du type d'activité au cours de la période de suivi

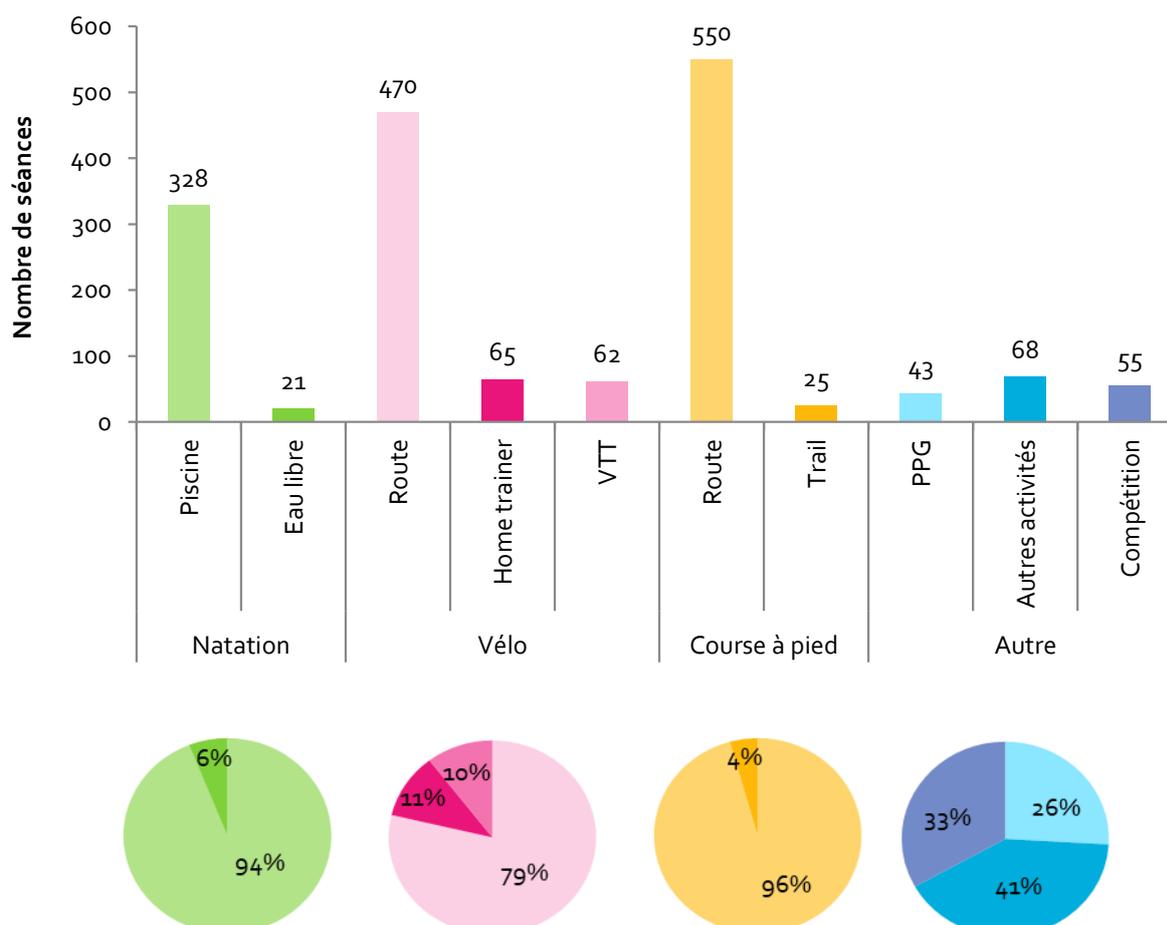
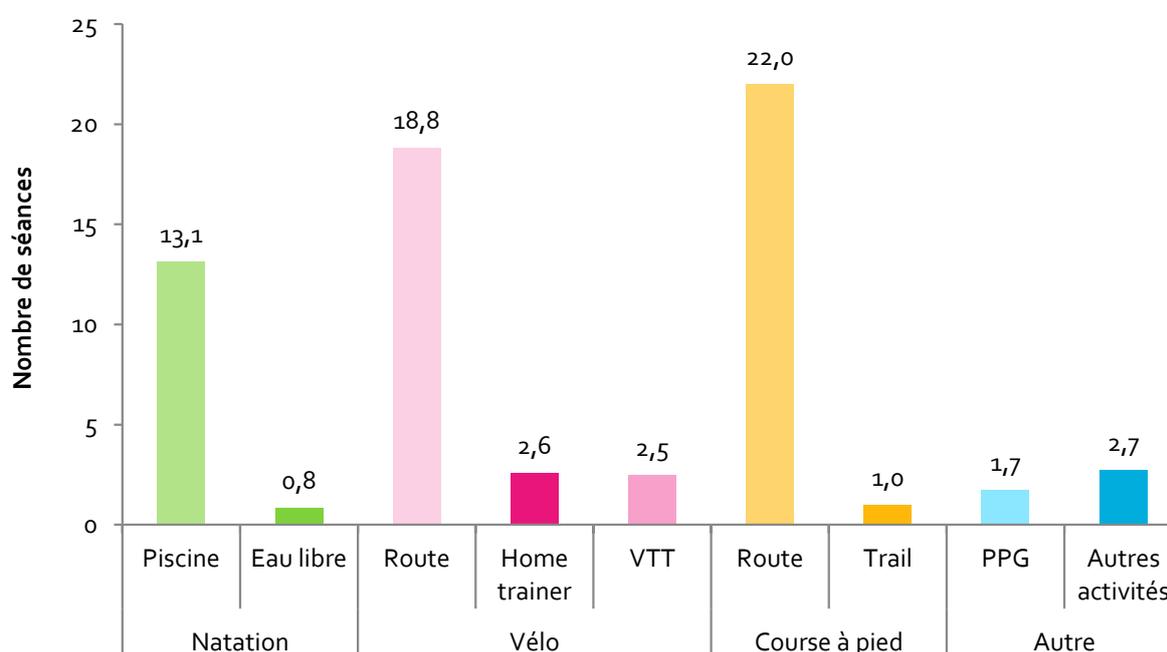


Figure 3-11b. Répartition en pourcentage du nombre de séances d'entraînement rapportées, en fonction du type d'activité au cours de la période de suivi

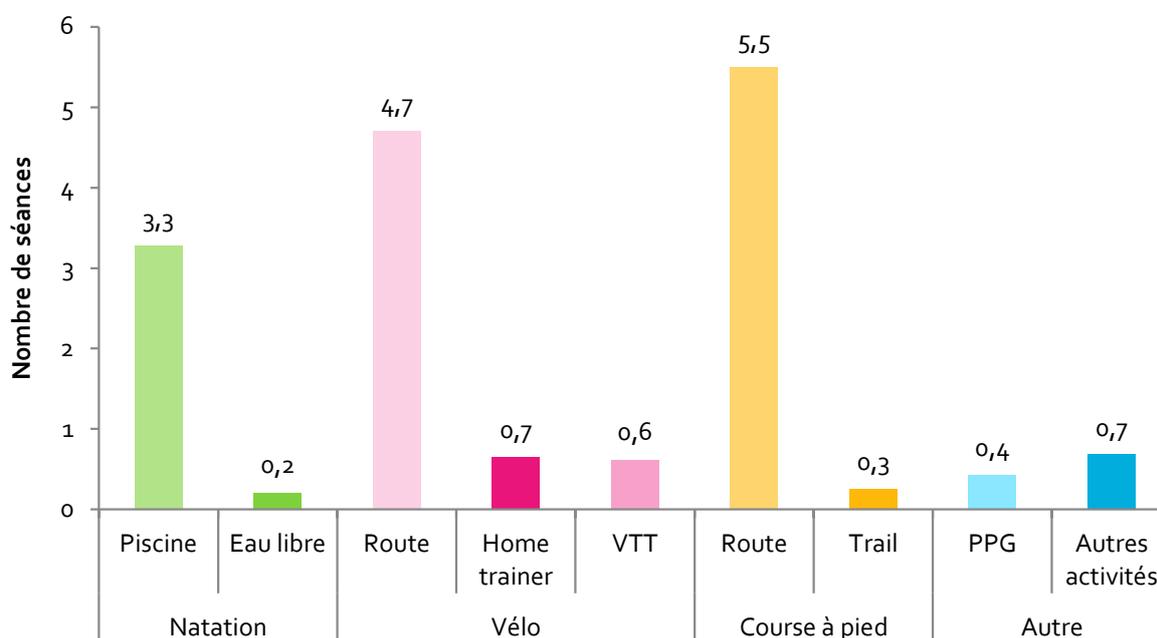
Toutefois, dans la présentation de nos résultats et dans notre réflexion, il sera plus adapté de se projeter en termes de mois d'entraînement et non en termes de données récoltées sur la période de suivi. Pour cela, nous devons procéder en deux étapes, comme l'illustre la **figure 3-12a-b**. Tout d'abord, la **figure 3-12a** montre la représentation du nombre moyen de séances par athlète en fonction du type d'activité et ce, au cours de la période de suivi.

Figure 3-12a. Représentation du nombre moyen de séances d'entraînement par athlète et par type d'activité, au cours de la période de suivi



La **figure 3-12a** se lit de la façon suivante : « Au cours des 16 mois de la période de suivi, un athlète aura réalisé en moyenne 22 séances de course à pied sur route. » ; ce qui peut se traduire par la réalisation de 1,4 séance par mois de suivi – à l'échelle d'une semaine d'observation, soit 5,5 séances par mois si on extrapole cette donnée à un mois d'entraînement de 4 semaines. Cette extrapolation est illustrée par la **figure 3-12b**.

Figure 3-12b. Représentation de l'extrapolation du nombre moyen de séances d'entraînement en fonction du type d'activité, pour un athlète et pour un mois d'entraînement de quatre semaines



➔ Ainsi, toutes nos données issues d'extrapolation et présentées dans les suites de cette troisième partie dédiée aux résultats de notre étude, auront suivi ce processus de calcul.

Intéressons-nous maintenant au volume d'entraînement cumulé sur la période de suivi donc hors compétition, soit une durée de 140 828 minutes ou 2347 heures et 8 minutes. La répartition de ces données en fonction de la discipline pratiquée est indiquée dans le **tableau 3-12**. On constate que l'entraînement vélo représente plus de la moitié du volume d'entraînement total étudié.

Tableau 3-12. Répartition du volume d'entraînement rapporté par secteur d'activité, y compris en pourcentage du volume total, au cours de la période de suivi

	Natation	Vélo	Course à Pied	Autre	Total
Durée totale					
en minutes	18 684	69 846	34 343	9 445	132 318
en heures	311,4	1 164,1	572,4	157,4	2 205,3
Pourcentage	14 %	53 %	26 %	7 %	100 %

La **figure 3-13a-b** s'intéresse à la représentation du temps d'entraînement cumulé en fonction du type d'activité sur l'ensemble de la période de suivi.

Figure 3-13a. Représentation du volume d'entraînement rapporté, en fonction du type d'activité au cours de la période de suivi

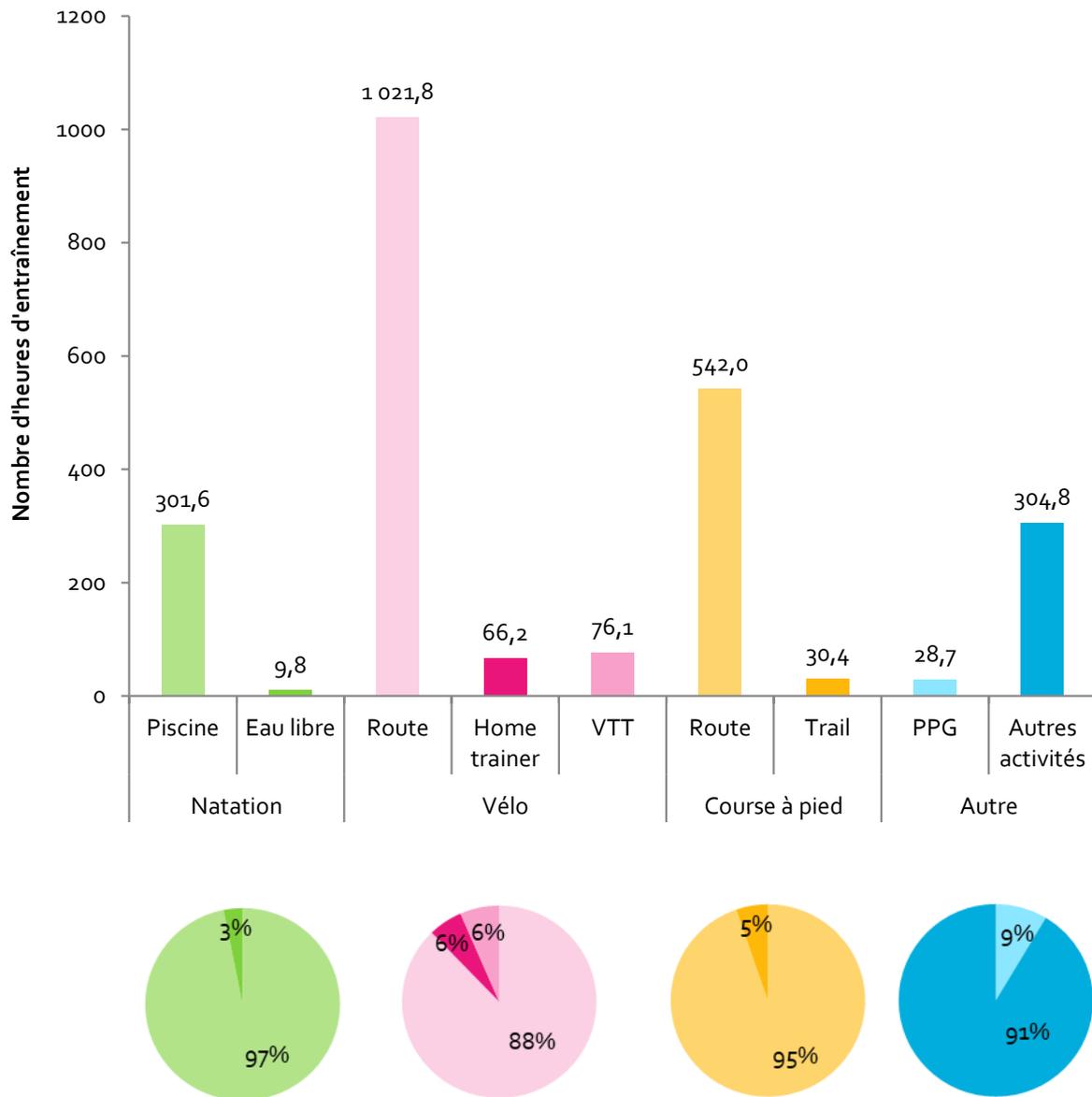
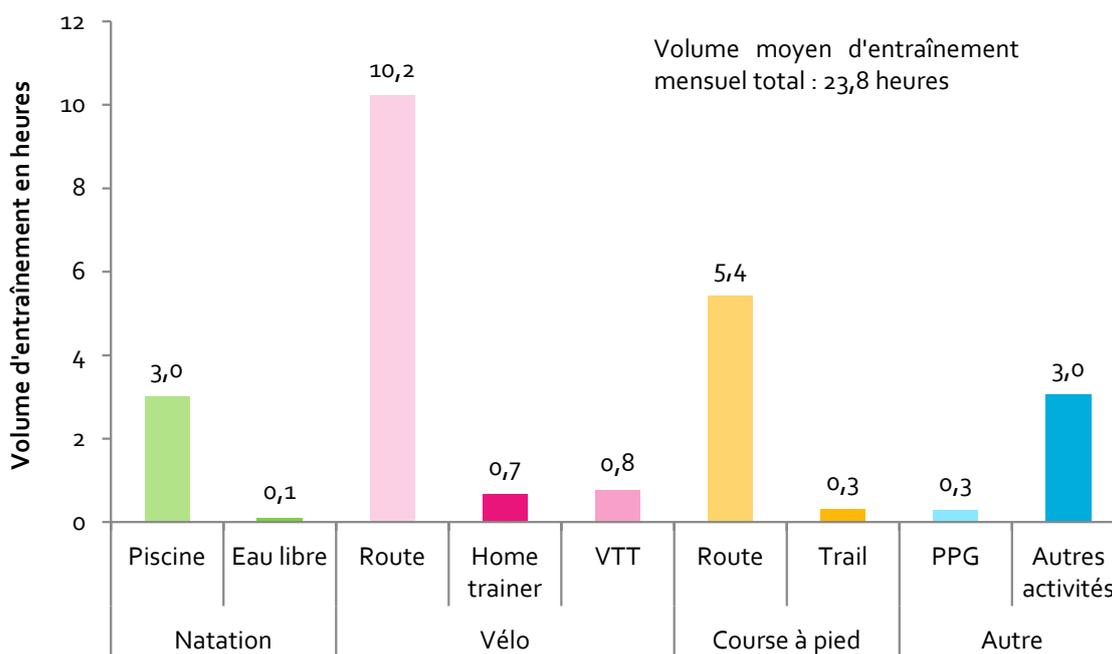


Figure 3-13b. Répartition en pourcentage du volume d'entraînement rapporté, en fonction du type d'activité au cours de la période de suivi

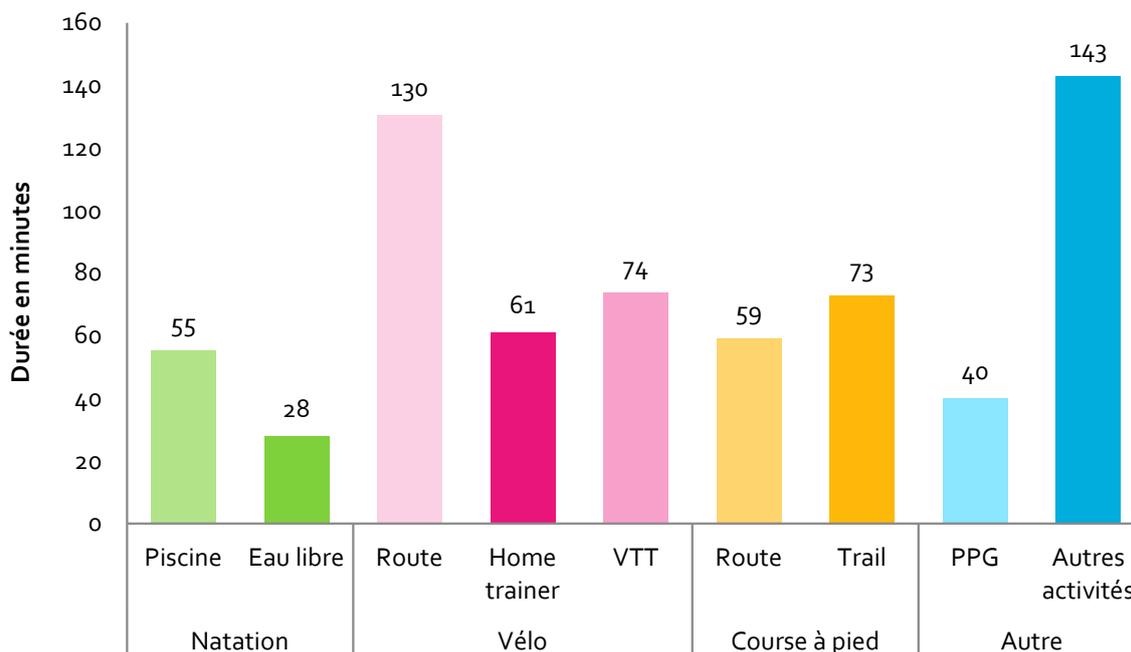
Par extrapolation, nous avons pu déterminer le volume d'entraînement moyen sur la période de suivi pour un athlète et ce, par secteur d'activité et pour une durée de quatre semaines (**figure 3-14**). Par exemple, un athlète de notre population nage en moyenne trois heures par mois, cette estimation ne tenant pas compte de la saisonnalité de l'entraînement.

Figure 3-14. Représentation de l'extrapolation du volume d'entraînement moyen par type d'activité, pour un athlète et pour un mois d'entraînement de quatre semaines



Enfin, la dernière figure – **figure 3-15** – représente la durée moyenne exprimée en minutes d'une séance d'entraînement en fonction du type d'activité et ce, sur la période de suivi de 16 mois. Par exemple, une séance de course à pied sur route dure en moyenne 59 minutes, ce chiffre ne tenant pas compte de la saisonnalité de l'entraînement.

Figure 3-15. Représentation de la durée moyenne exprimée en minutes d'une séance d'entraînement, en fonction du type d'activité au cours de la période de suivi



Terminons par quelques mots sur les compétitions complétées au cours de ces 16 mois de suivi. Nous en avons donc comptabilisé 55, essentiellement de triathlon (22 soit 40 %) et de course à pied (12 soit 22 %). Rapportées au nombre d'athlètes et sans extrapolation, cela représente 1,6 compétition par athlète, soit moins de 2 compétitions déclarées sur l'ensemble de la période de suivi (compétition de référence non comprise). Le volume horaire global est de l'ordre de 141,8 heures soit une durée moyenne par compétition de 2 h 35.

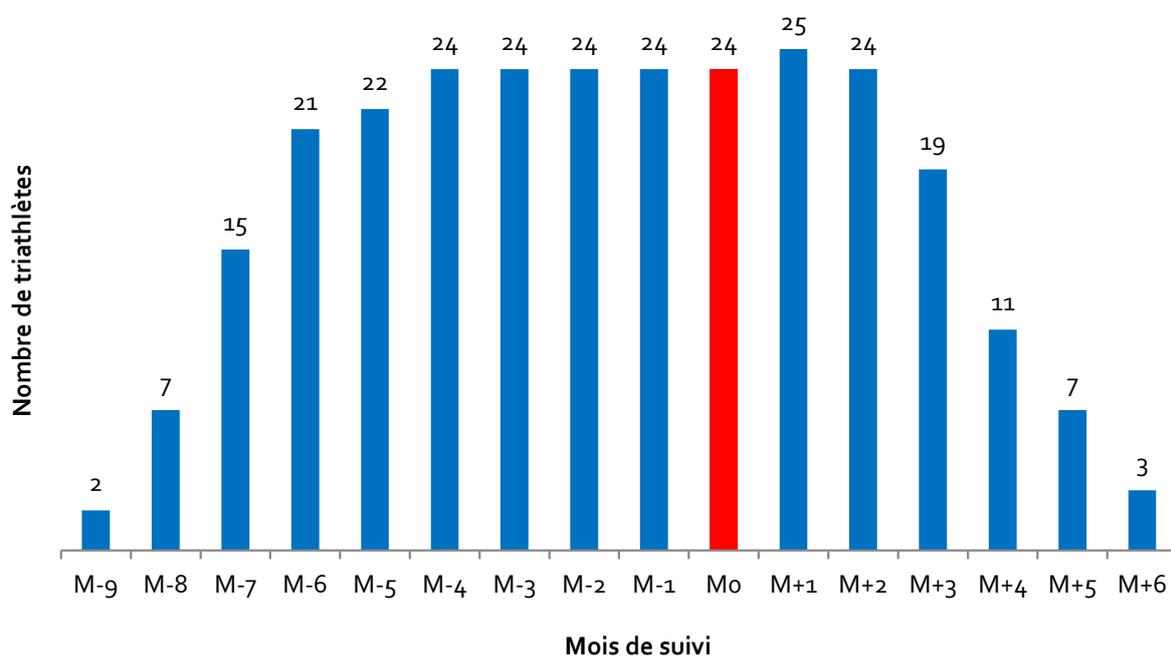
Au total, les résultats extrapolés ne sont qu'une piètre projection de l'entraînement d'un triathlète, qui varie et dépend de la saison sportive mais aussi des conditions climatiques. C'est pourquoi nous proposons de faire une analyse plus fine de l'entraînement de nos volontaires, en étudiant dans le prochain paragraphe les différents paramètres en fonction du mois de suivi.

2. Analyse par mois

a. Bases de l'analyse

Tout d'abord, la **figure 3-16** représente le nombre d'athlètes par mois de suivi, qui ont fourni des informations sur leur entraînement. Pour harmoniser les données dans la mesure où tous les athlètes n'ont pas participé à la même course de référence – également appelée objectif de la saison sportive, le mois au cours duquel a été réalisée la-dite course a été nommé « **Mo** ». Les mois de suivi qui ont eu lieu avant l'objectif ont été nommés « M-x » et les mois de suivi qui ont eu lieu après l'objectif ont été nommés « M+x », avec x le numéro du mois en question. Par exemple, M-4 représente le quatrième mois d'entraînement avant la course de référence.

Figure 3-16. Représentation du nombre de triathlètes ayant fourni des éléments d'entraînement en fonction du mois de suivi



Nous rappelons que ce suivi sur un total de 16 mois a permis d'étudier un nombre cumulé de 1632 séances d'entraînement, donc hors compétition. La **figure 3-17a** montre cette répartition en fonction du mois de suivi tandis que la **figure 3-17b** est une extrapolation de ces résultats selon la méthode décrite dans le paragraphe précédent (§ II.A.1). D'après nos calculs, le nombre mensuel moyen de séances est de 24,1 avec un écart-type de 3,29 tandis que la valeur médiane est de 24,5 séances.

Figure 3-17a. Représentation du nombre de séances d'entraînement rapportées en fonction du mois de suivi

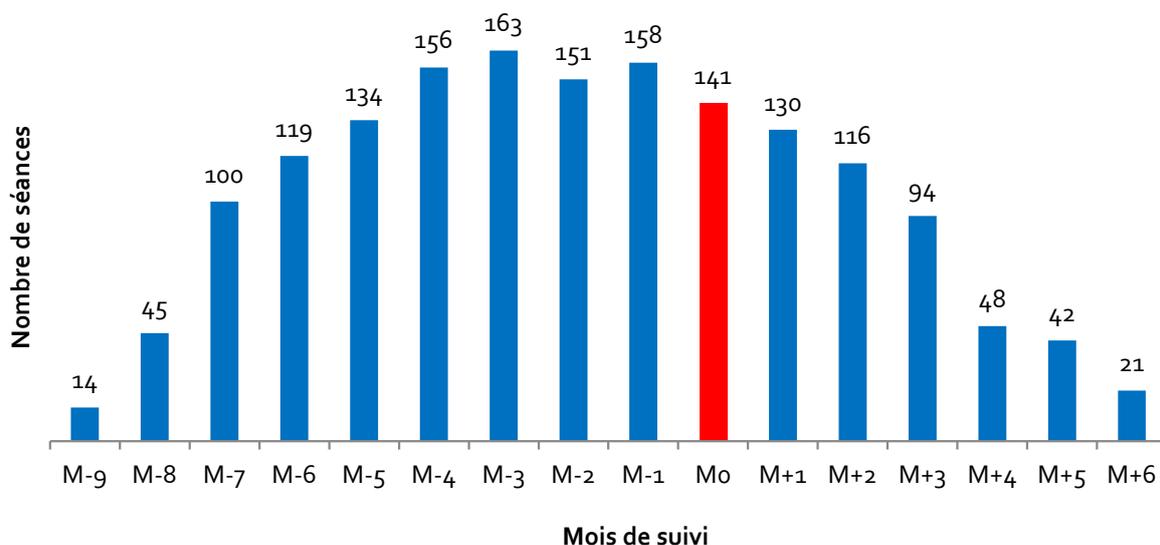
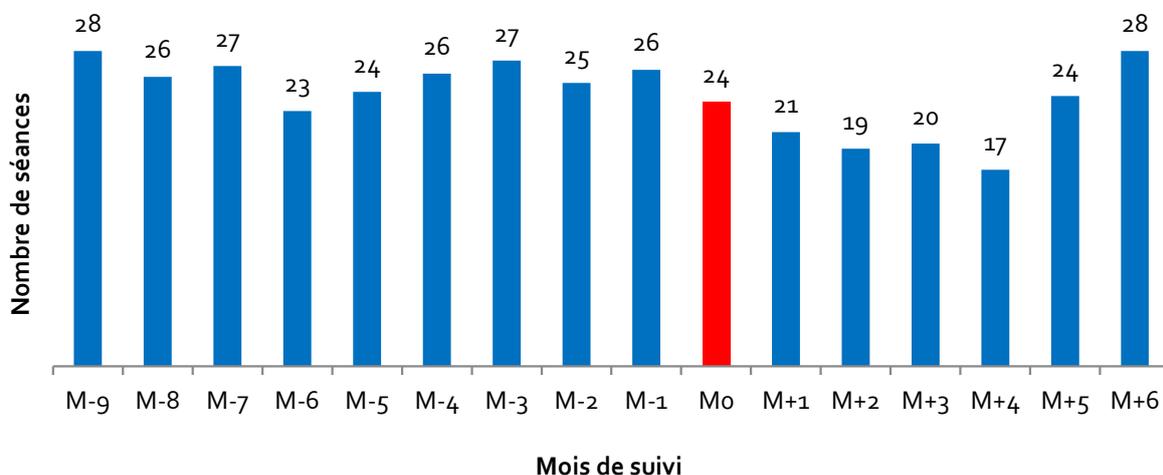
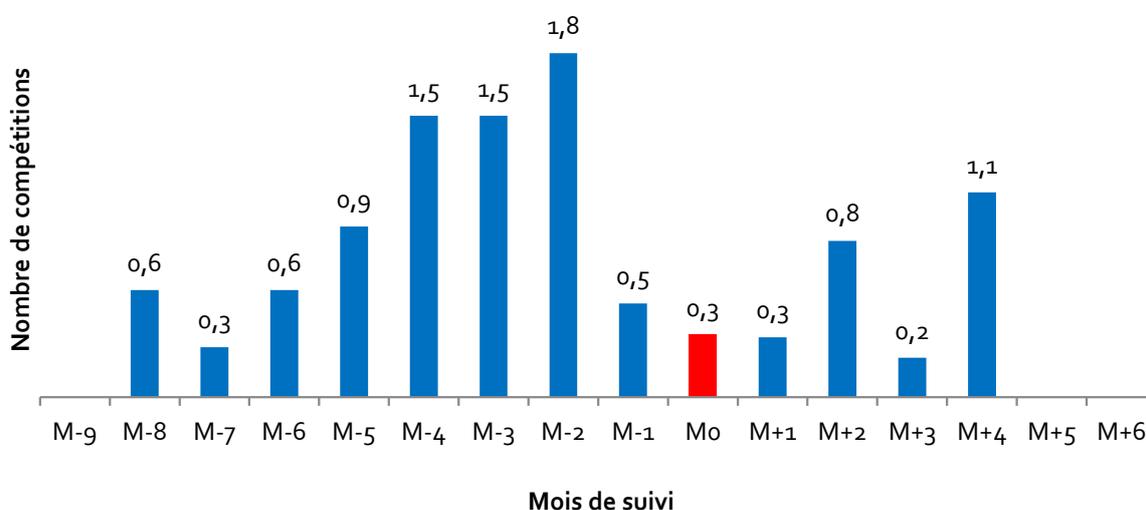


Figure 3-17b. Représentation de l'extrapolation du nombre moyen de séances d'entraînement pour un athlète et pour un mois d'entraînement de quatre semaines



Pour finir, nos athlètes ont fait état de 55 séances dites de compétition – hors objectif de la saison sportive – sur l’ensemble des 16 mois de suivi. La **figure 3-18** représente l’extrapolation du nombre moyen de compétitions courues par un athlète au cours des différents mois de suivi. On constate que la période majeure de compétition se situe entre M-4 et M-2 avec un nombre compris entre 1,5 et 1,8 mais aussi que le nombre mensuel moyen est extrêmement variable tout au long de la période étudiée, sans tendance nette.

Figure 3-18. Représentation de l’extrapolation du nombre moyen de compétitions courues par athlète en fonction du mois de suivi



b. Analyse sur le nombre de séances

La **figure 3-19a-b** représente le nombre total de séances réalisées par mois de suivi et pour chacune des disciplines principales – natation, vélo, course à pied – et les autres activités, ainsi que leur extrapolation. Parmi les activités de natation ont été comptabilisés les entraînements en piscine et en eau libre (lacs et mer). Pour le vélo, les athlètes s’entraînent sur route mais également sur dispositif d’entraînement statique à la maison (home trainer) ou encore en pleine nature (VTT). Pour la course à pied, les séances se font sur route ou sur piste d’athlétisme, ou encore en pleine nature (trail). Les autres activités (PPG, randonnée ...) sont également représentées.

Figure 3-19a. Représentation du nombre total de séances d'entraînement rapportées pour chacune des disciplines principales, en fonction du mois de suivi

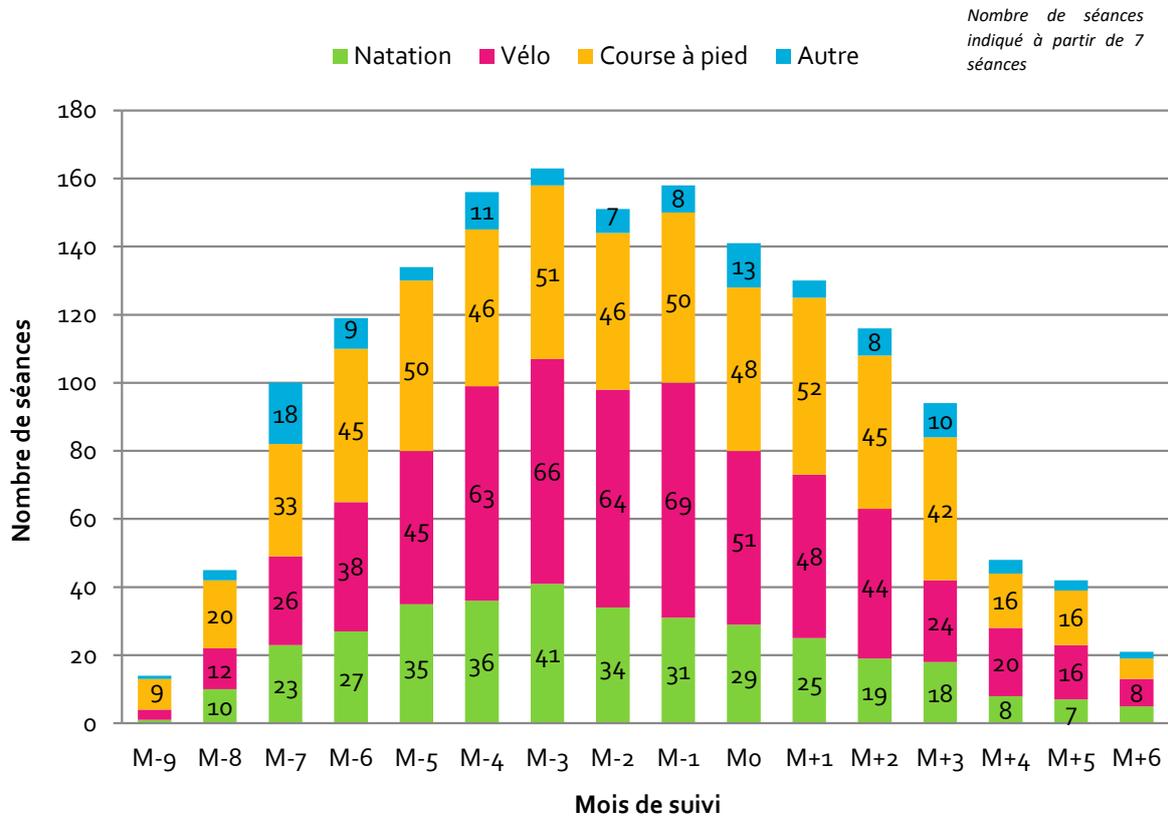
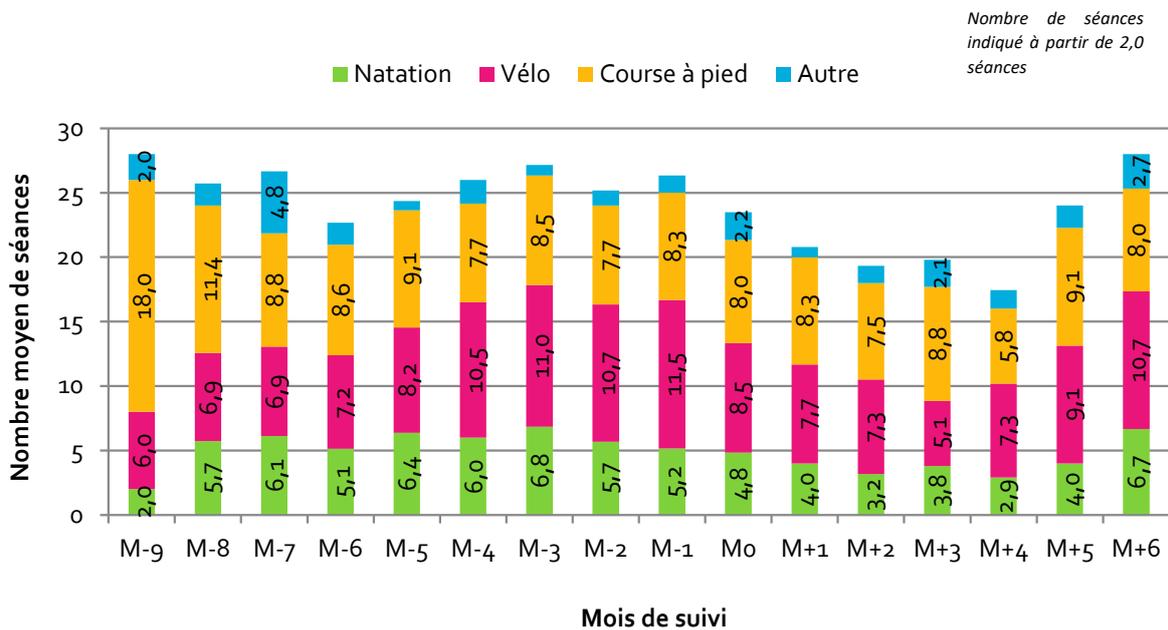


Figure 3-19b. Représentation de l'extrapolation du nombre moyen de séances d'entraînement en fonction du mois de suivi et de la discipline étudiée, pour un athlète et pour un mois d'entraînement de quatre semaines



On constate que, pour la natation et le vélo, la variabilité du nombre de séances suit globalement la variabilité générale. Ceci semble moins vrai pour la course à pied avec un pic majeur du nombre de séances sur la période M-9 – M-8. Enfin, pour les autres activités, la tendance est assez variable tout au long de la période de suivi.

Afin d’avoir une vision plus précise de ce qu’il se passe dans chaque discipline, nous proposons une représentation du nombre brut de séances rapportées par nos volontaires en fonction du mois de suivi pour la natation (**figure 3-20a**), le vélo (**figure 3-21a**), la course à pied (**figure 3-22a**) et les autres activités (PPG, randonnée ...) (**figure 3-23a**). Les chiffres bruts sont accompagnés de leurs données extrapolées respectives, selon la méthode proposée un peu plus tôt (**figures 3-20b, 3-21b, 3-22b et 3-23b**).

Figure 3-20a. Représentation du nombre total de séances d’entraînement de natation rapportées en fonction du mois de suivi

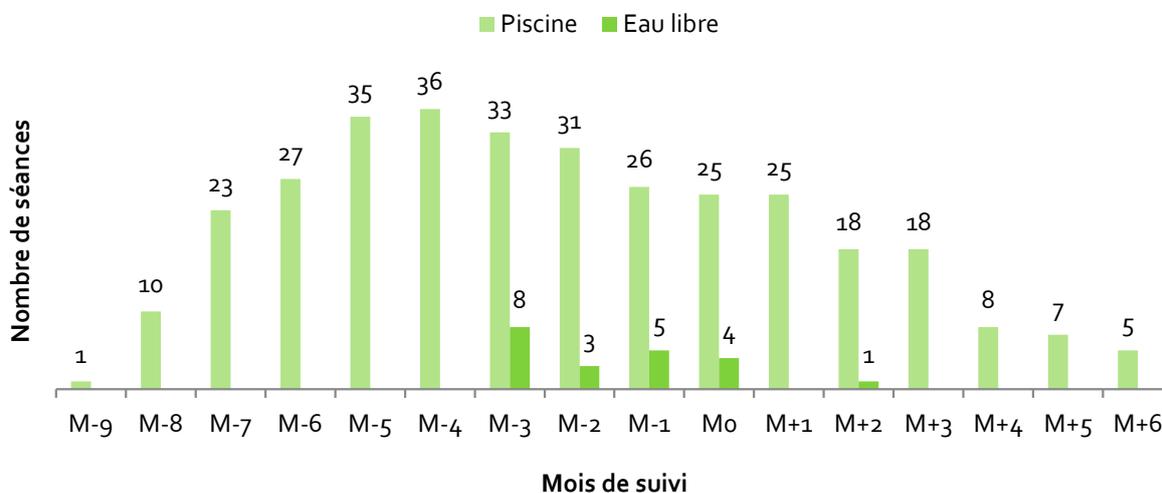
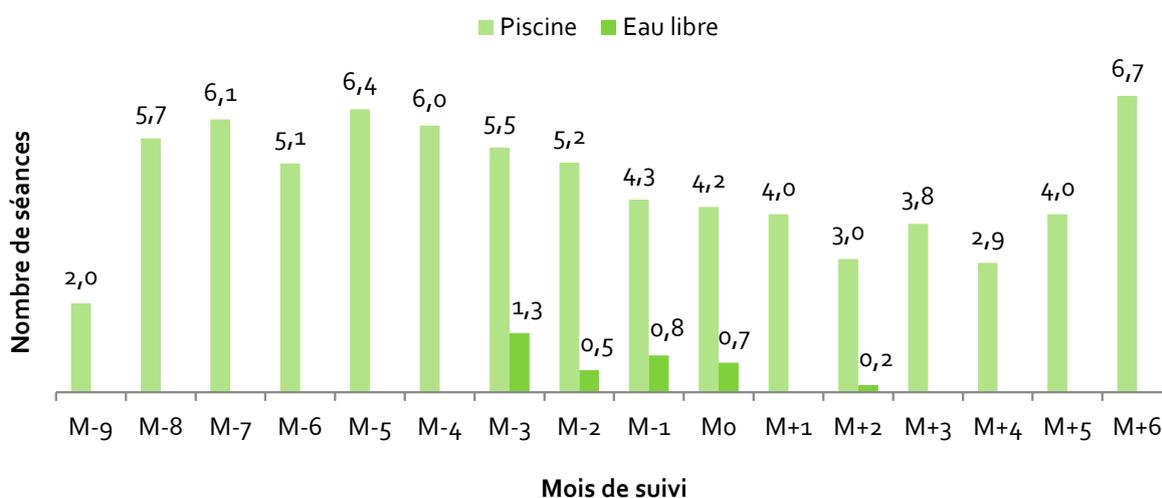


Figure 3-20b. Représentation de l’extrapolation du nombre moyen de séances d’entraînement de natation en fonction du mois de suivi, pour un athlète et pour un mois d’entraînement de quatre semaines



On constate que les triathlètes réalisent davantage de séances de natation durant la période M-8 – M-2 ainsi que pendant M+6. Leur nombre, qui n’excède jamais les huit séances par mois soit deux séances par semaine au maximum, tend à baisser progressivement de M-5 jusqu’à M+2. Autre constat : nos triathlètes nagent que très rarement en eau libre (moins d’une séance par mois en général) et que durant six mois dans l’année tout au plus.

Figure 3-21a. Représentation du nombre total de séances d’entraînement de vélo rapportées en fonction du mois de suivi

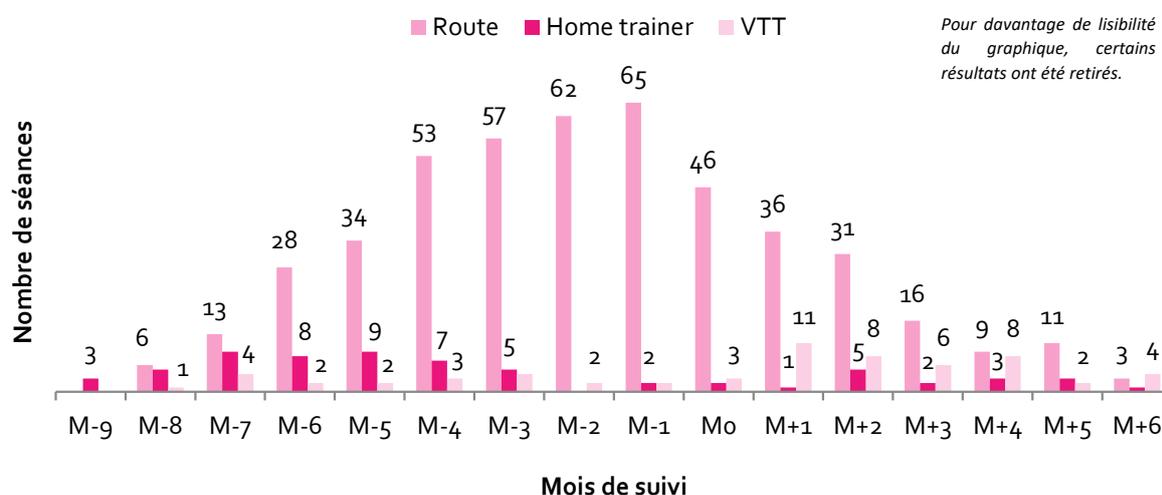
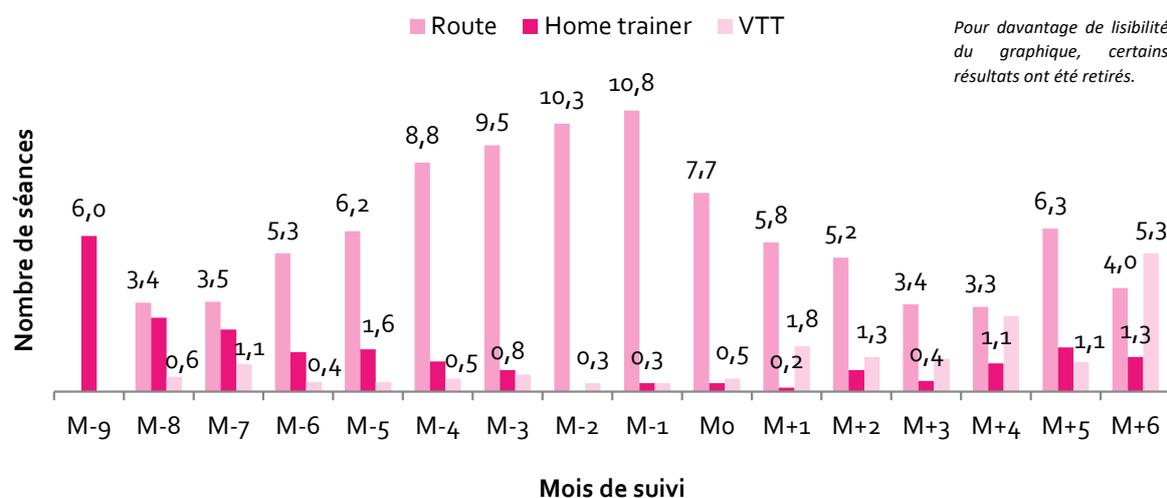


Figure 3-21b. Représentation de l'extrapolation du nombre moyen de séances d'entraînement de vélo en fonction du mois de suivi, pour un athlète et pour un mois d'entraînement de quatre semaines



Du côté des entraînements de vélo, on remarque que la pratique sur home trainer est globalement restreinte à deux périodes, à savoir M-9 – M-5 puis M+4 – M+6. La pratique du VTT suit quelque peu cette même tendance et est encore plus anecdotique que la pratique sur home trainer. La pratique du cyclisme sur route reste majoritaire tout au long de l'année et augmente progressivement entre M-8 et M-1, pour atteindre plus de dix séances par mois. Dès M0 atteint et passé, le nombre de séances d'entraînement diminue plus rapidement sur les trois mois qui suivent (M+1 à M+3).

Figure 3-22a. Représentation du nombre total de séances d'entraînement de course à pied rapportées en fonction du mois de suivi

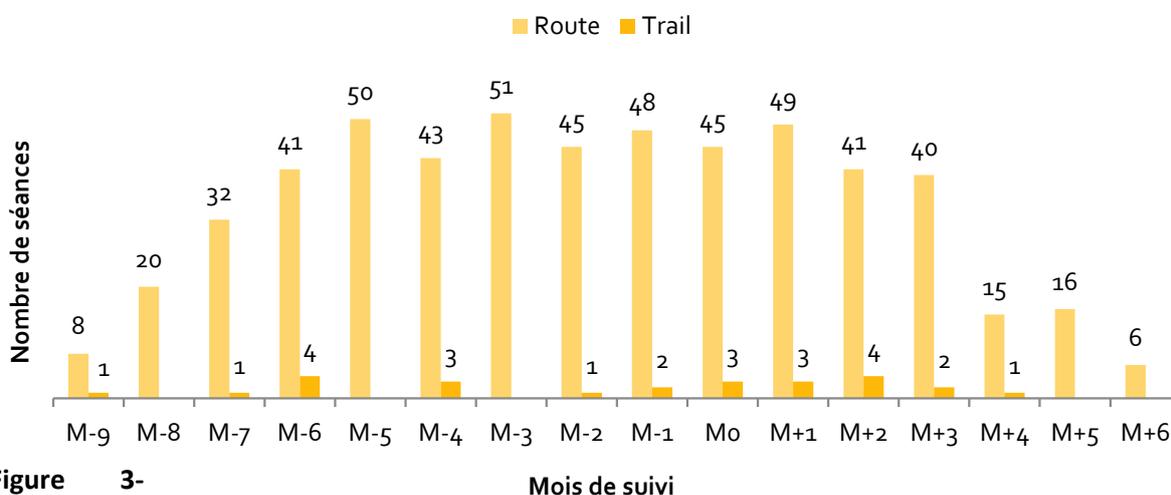
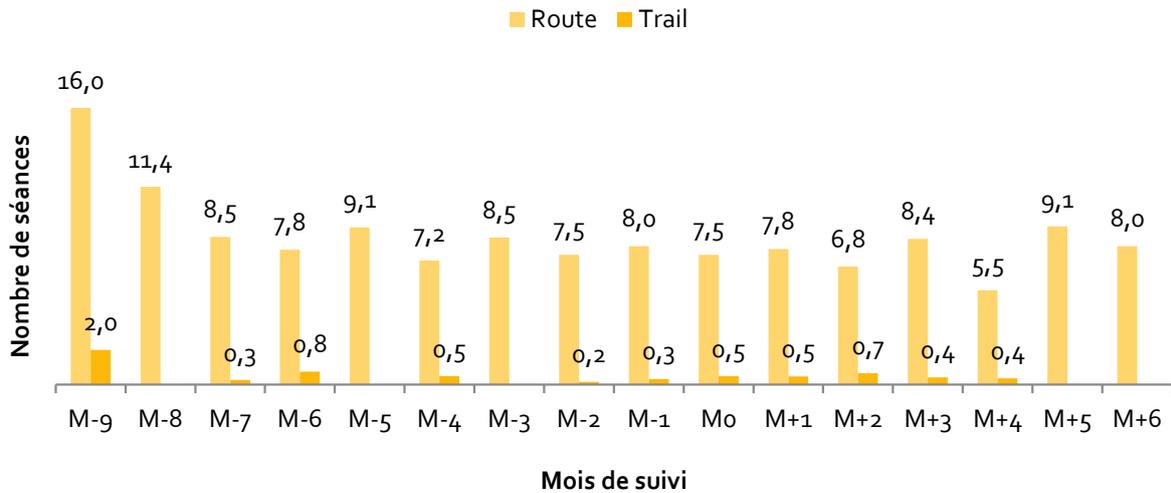


Figure 3-22b.

Représentation de l'extrapolation du nombre moyen de séances d'entraînement de course à pied en fonction du mois de suivi, pour un athlète et pour un mois d'entraînement de quatre semaines



Concernant la course à pied, le nombre de séances est relativement stable entre M-7 et M+6, globalement entre 7 et 9 séances par mois. Seuls M-9 et M-8 font figure d'exception avec un chiffre mensuel excédant les dix séances, et M+4 avec un chiffre de 5,5. La pratique du trail est anecdotique avec moins d'une séance par mois, quel que soit le mois de suivi (excepté M-9).

Figure 3-23a. Représentation du nombre total de séances d'entraînement pour les autres activités en fonction du mois de suivi

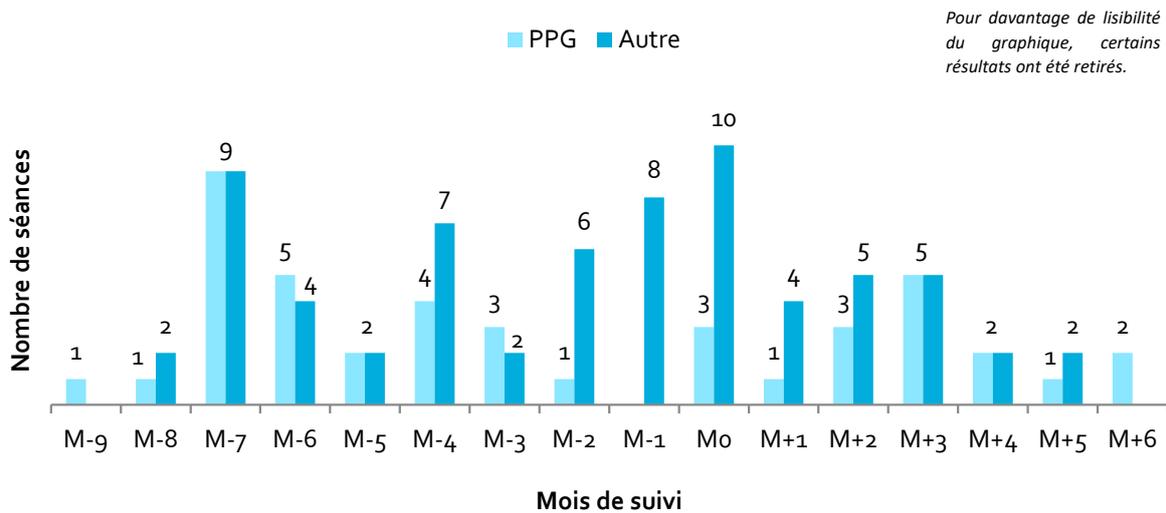
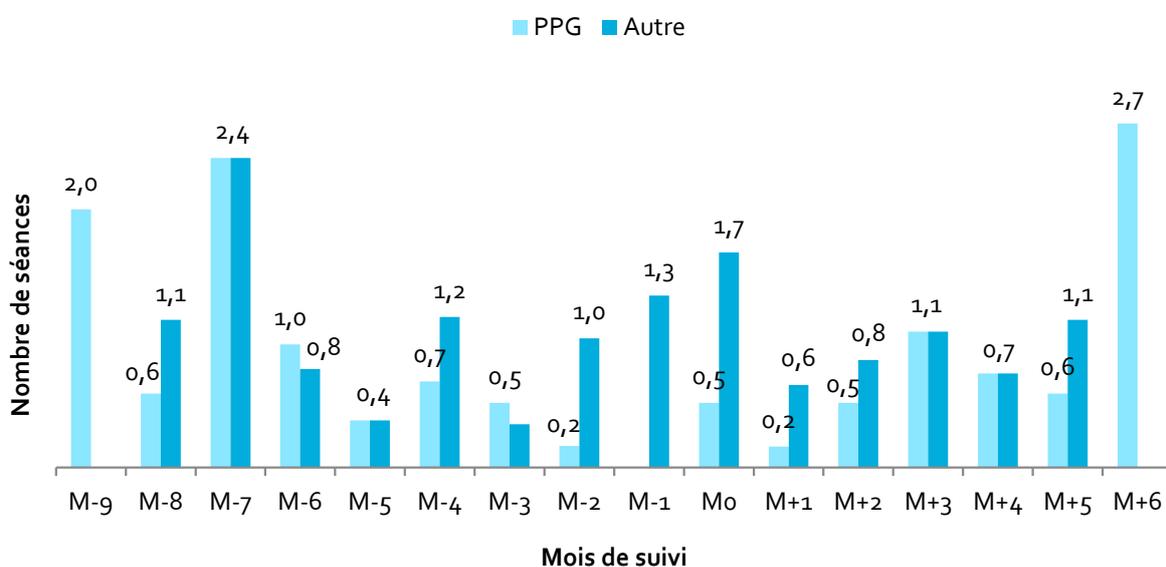


Figure 3-23b. Représentation de l'extrapolation du nombre moyen de séances d'entraînement pour les autres activités en fonction du mois de suivi, pour un athlète et pour un mois d'entraînement de quatre semaines



Enfin, du côté des autres activités dont fait partie la préparation physique globale (PPG), il n'y a pas de tendance qui se dégage clairement.

c. Analyse sur le volume d'entraînement

Dans ce paragraphe, nous proposons de conduire la même sorte d'analyse qu'au paragraphe précédent mais, cette fois-ci, nous allons nous intéresser au volume d'entraînement. Les **figures 3-24a** et **3-24b** représentent ce dernier par mois de suivi et pour chacune des disciplines principales – natation, vélo, course à pied – mais également pour les autres activités, ainsi que leur extrapolation respective.

Figure 3-24a. Représentation du volume d'entraînement total rapporté pour chacune des disciplines principales et en fonction du mois de suivi

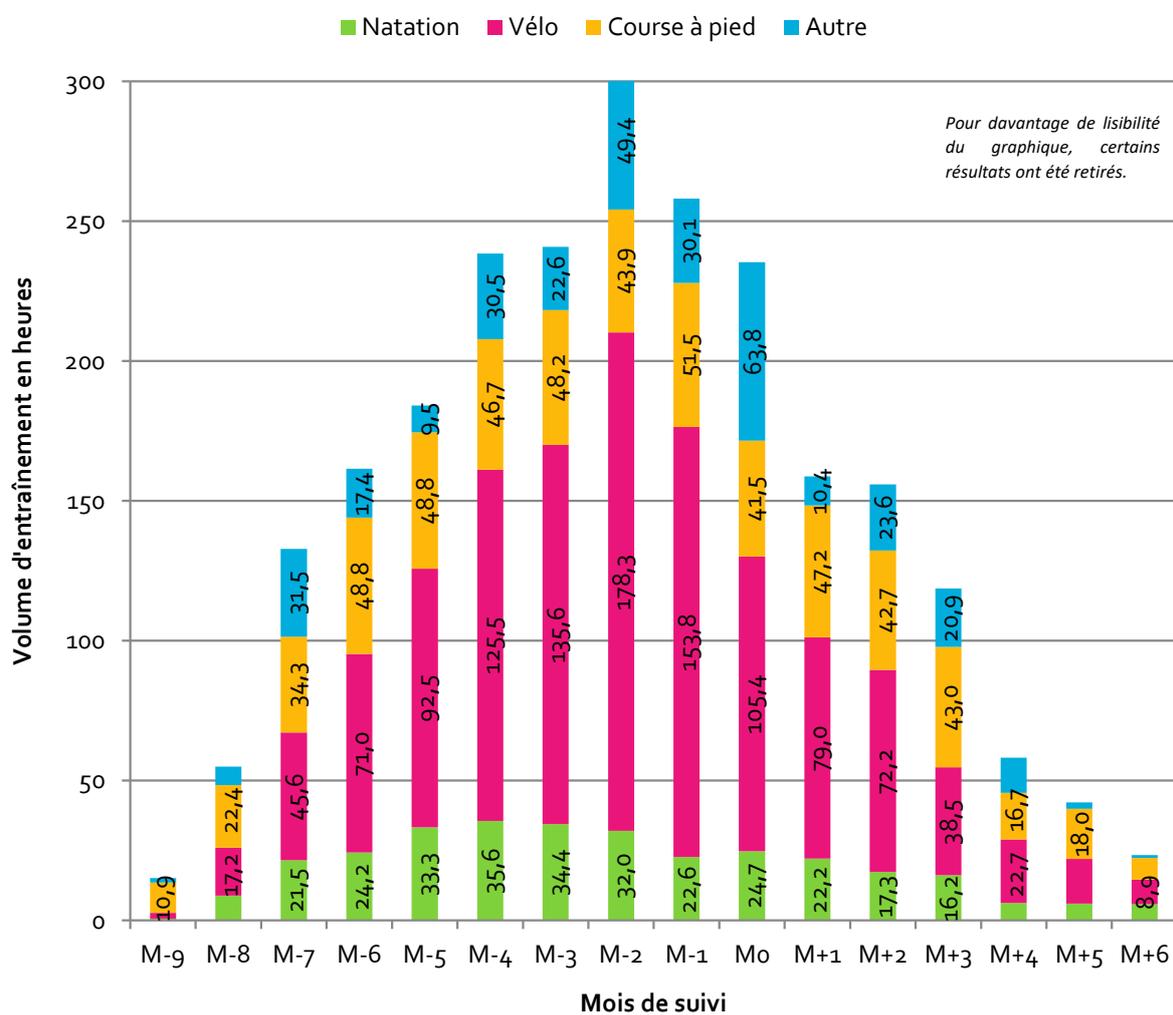
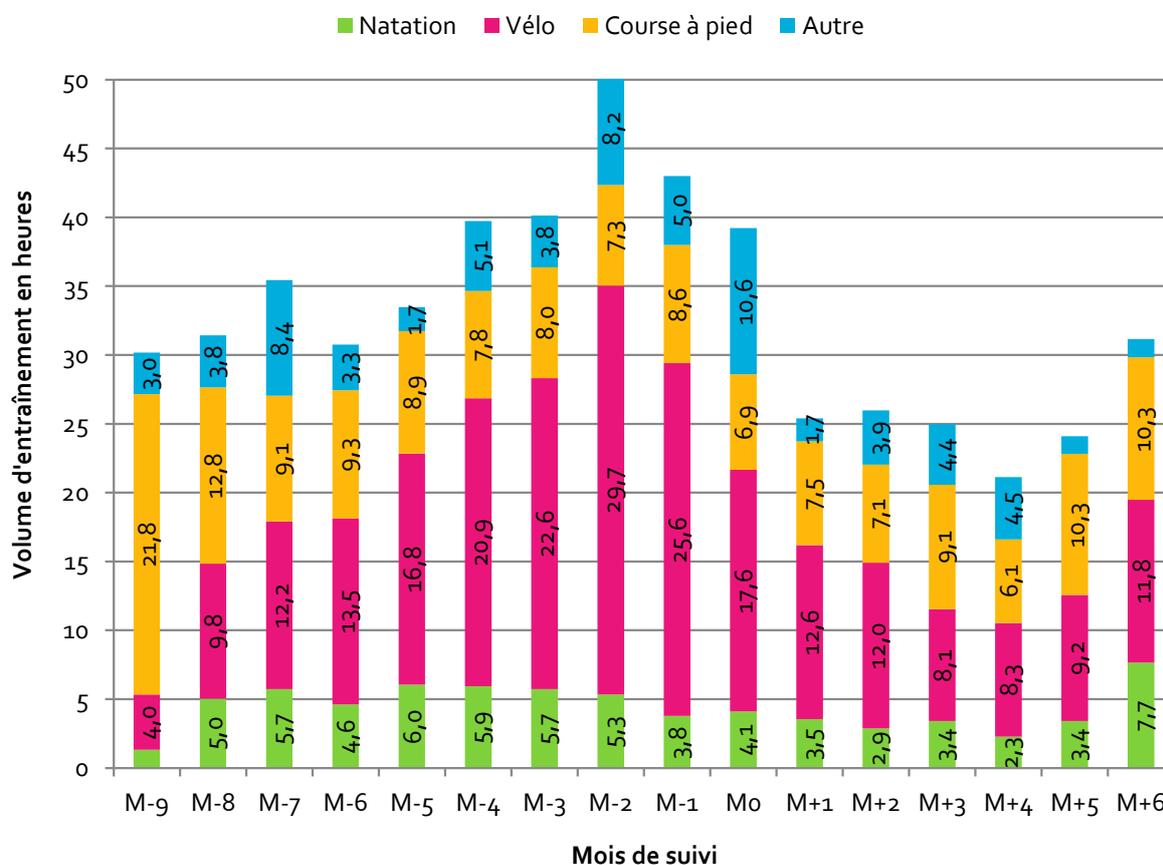


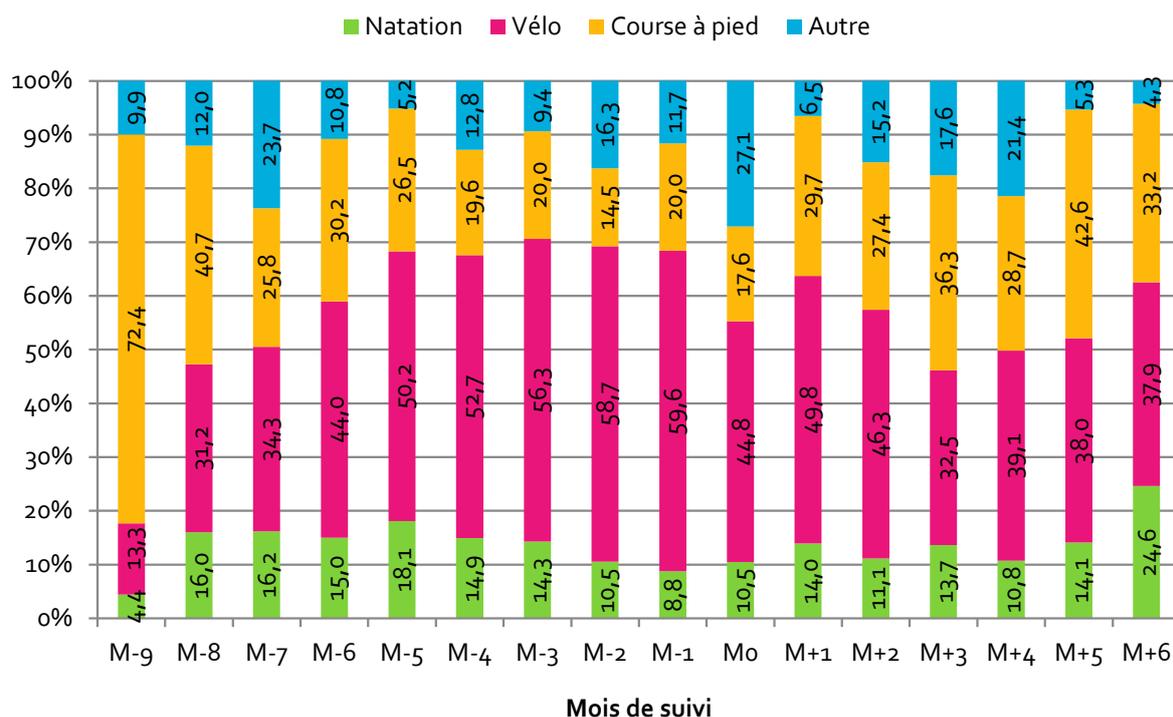
Figure 3-24b. Représentation de l'extrapolation du volume d'entraînement moyen en fonction du mois de suivi et de la discipline étudiée, pour un athlète et pour un mois d'entraînement de quatre semaines



D'une façon générale, on constate une augmentation progressive du volume horaire d'entraînement à partir de M-6 jusqu'à M-2. Dès M-1 s'amorce une diminution, après un net décrochage à M+1, puis jusqu'à M+4.

Toutefois, il est intéressant d'observer l'évolution de la part – en termes de pourcentage – de chaque volume horaire d'entraînement par discipline en fonction du volume total (figure 3-24c).

Figure 3-24c. Représentation de l'extrapolation du volume d'entraînement moyen sous forme de pourcentage de temps total passé chaque mois, pour chaque discipline étudiée et en fonction du mois de suivi, pour un athlète et pour un mois d'entraînement de quatre semaines



Globalement et en s'affranchissant des deux valeurs extrêmes de 4,4 et 24,6 %, on constate que la part de la natation oscille entre 8 et 18 % du volume horaire d'entraînement total, avec une proportion plus importante sur la période M-8 – M-5. Après, on observe une diminution jusqu'à M-1 puis une augmentation très progressive sur les mois suivants. Du côté du vélo, celui-ci représente entre 40 et 60 % du volume horaire total durant près des deux tiers de la période de suivi, de M-6 à M+2 pour être plus précis. Quant à la course à pied, les plus gros volumes relatifs sont observés sur les périodes M-9 – M-8 puis M+3 – M+6, avec une part de près de 30 % et plus. Le volume horaire de course à pied sur la période complémentaire se situe entre 15 et 30 %. Enfin, les autres activités représentent un volume horaire relatif de 5 à 20 %, variable en fonction des différents mois.

Encore une fois, pour avoir une vision plus précise de ce qu'il se passe dans chaque discipline, nous proposons une représentation du volume d'entraînement global rapporté par nos volontaires en fonction du mois de suivi pour la natation (**figure 3-25a**), le vélo (**figure 3-26a**), la course à pied (**figure 3-27a**) et les autres activités (**figure 3-28a**). Les chiffres bruts sont suivis immédiatement des résultats extrapolés pour une meilleure compréhension (**figures 3-25b, 3-26b, 3-27b et 3-28b**).

Figure 3-25a. Représentation du volume d'entraînement total de natation rapporté en fonction du mois de suivi

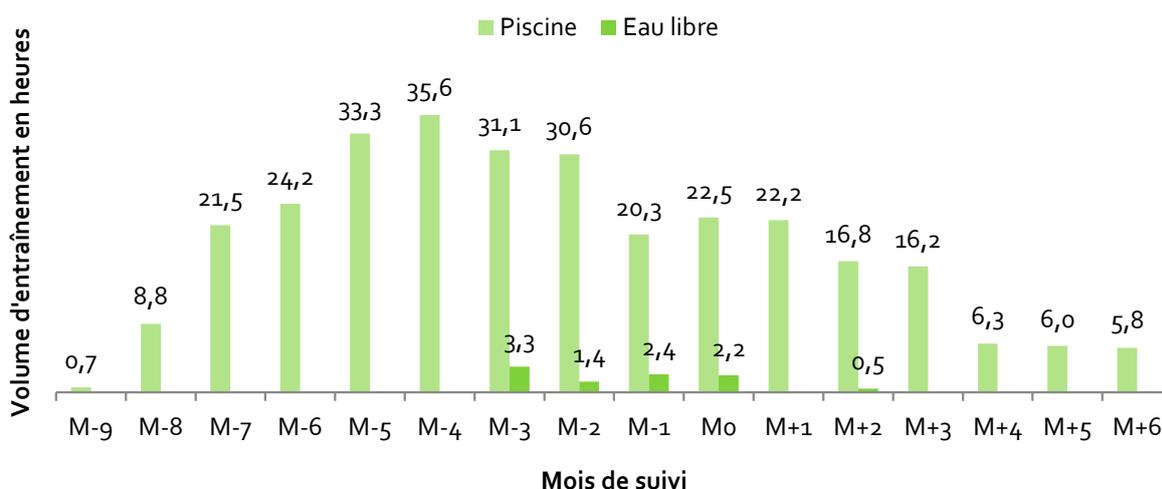
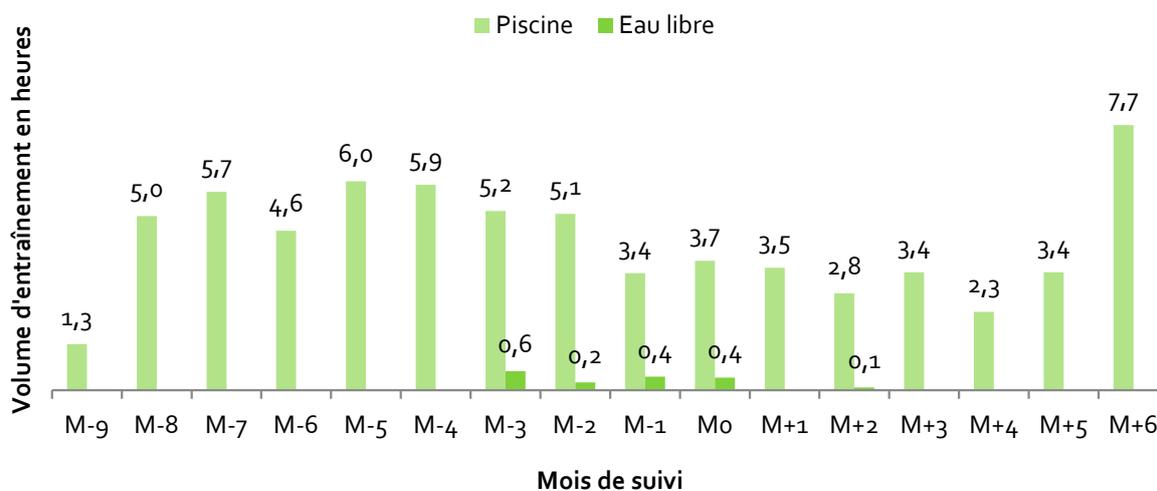


Figure 3-25b. Représentation de l'extrapolation du volume d'entraînement moyen de natation en fonction du mois de suivi, pour un athlète et pour un mois d'entraînement de quatre semaines



Pour la natation en piscine, la tendance est assez variable avec un volume horaire mensuel progressivement croissant entre M-8 et M-5 atteignant six heures d'entraînement par mois, pour diminuer progressivement ensuite jusqu'à M+4. Quant à la pratique en eau libre, elle est très anecdotique à raison de moins d'une heure par mois et essentiellement sur la période M-4 – M0.

Figure 3-26a. Représentation du volume d'entraînement total de vélo rapporté en fonction du mois de suivi

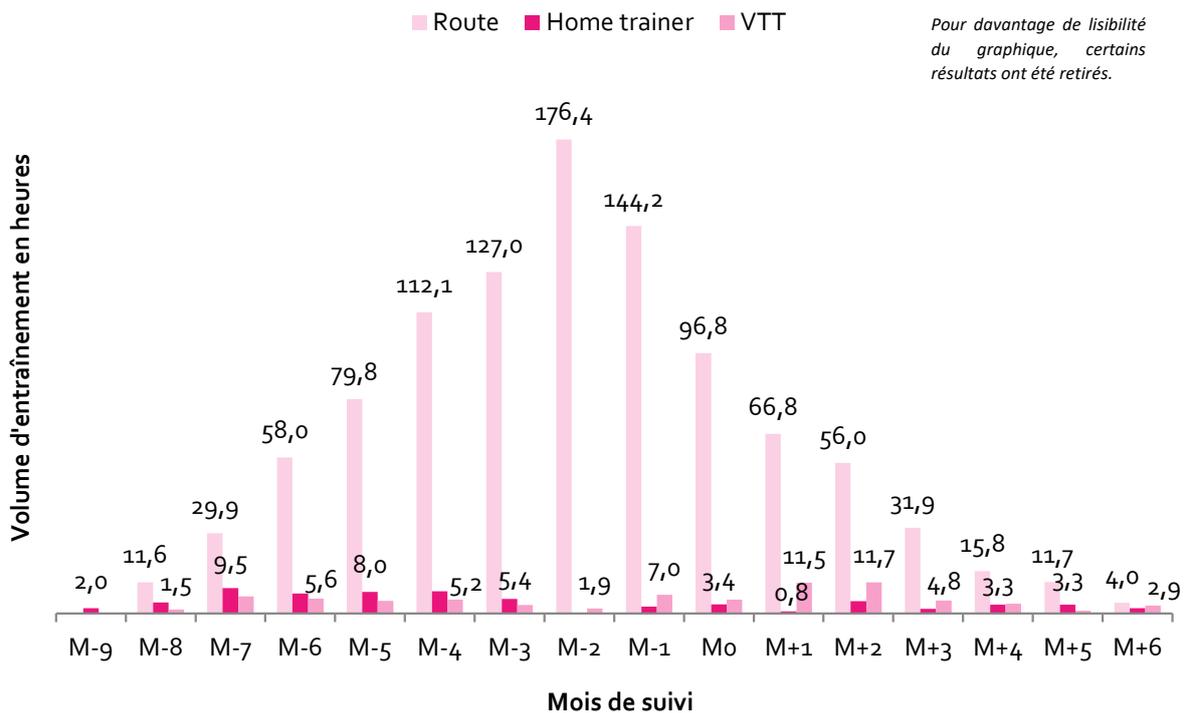
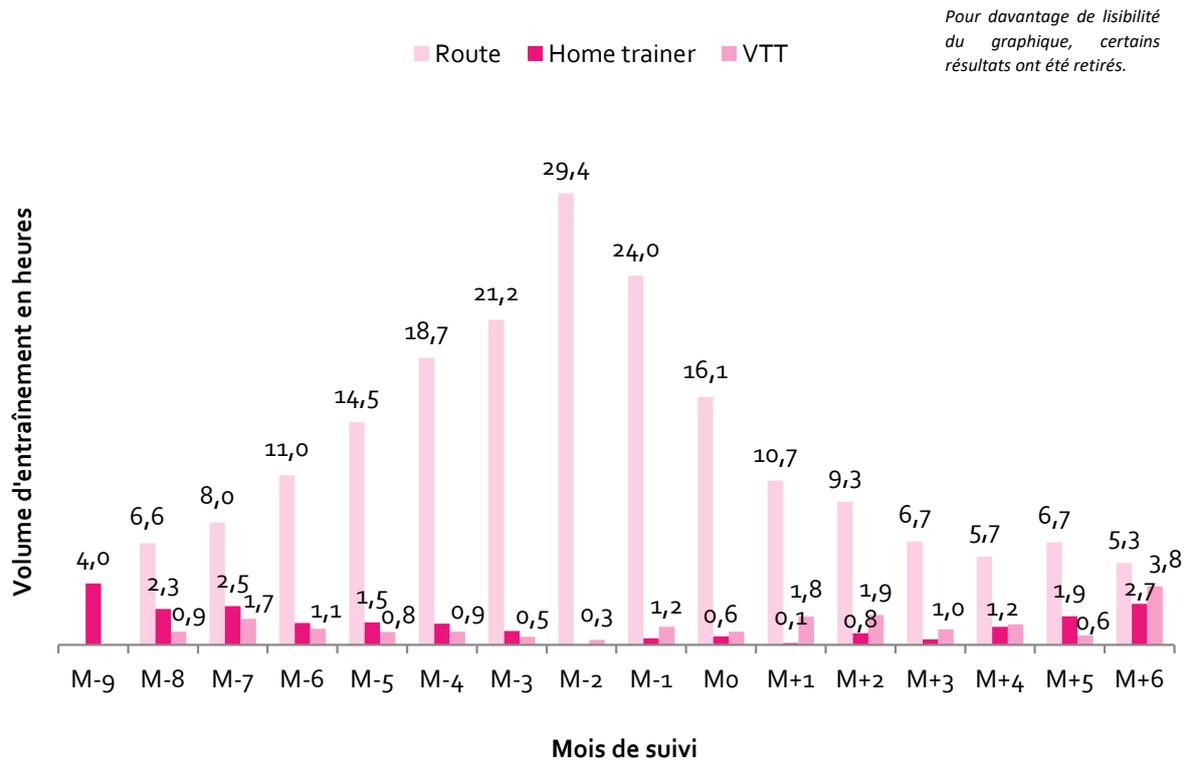


Figure 3-26b. Représentation de l'extrapolation du volume d'entraînement moyen de vélo en fonction du mois de suivi, pour un athlète et pour un mois d'entraînement de quatre semaines



Pour le vélo, on voit que la pratique est nettement dominée par le vélo de route et ce, de M-8 jusqu'à M+6. On observe une augmentation progressive du volume horaire pour atteindre un pic à près de 30 heures de vélo lors de M-2. Ensuite, la diminution est plus rapide jusqu'à M+1 puis ralentit entre M+1 et M+6. Les volumes d'entraînement de home trainer et de VTT sont proches entre eux et évoluent en sens inverse par rapport à la pratique sur route : diminution du volume entre M-9 et M-2 puis réaugmentation progressive jusqu'à M+6.

Figure 3-27a. Représentation du volume d'entraînement total de course à pied rapporté en fonction du mois de suivi

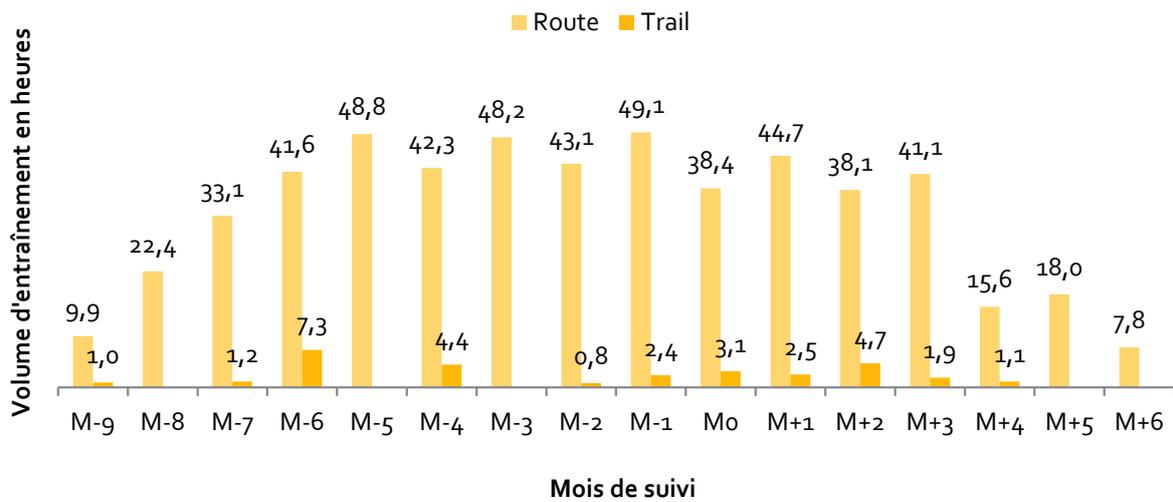
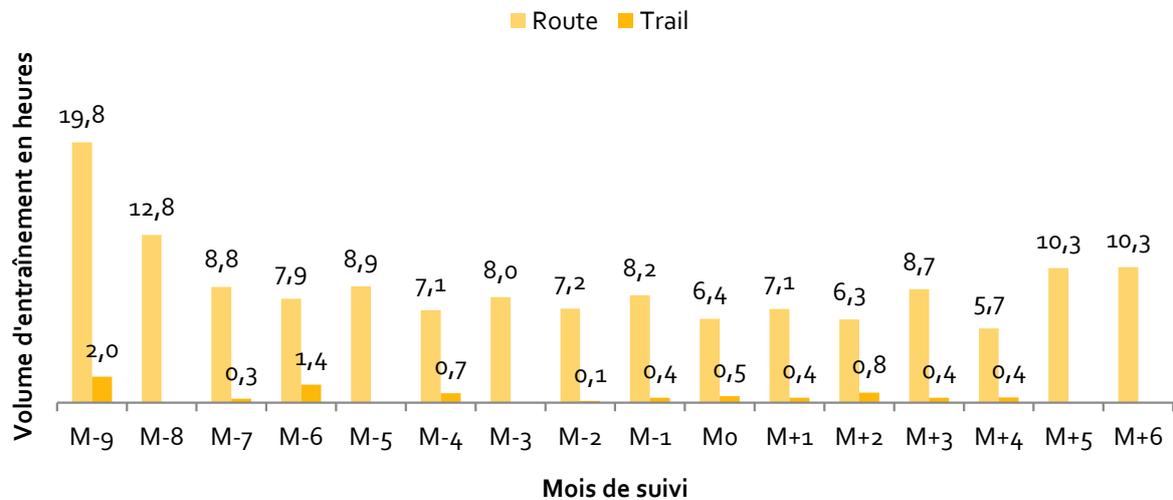


Figure 3-27b : Représentation de l'extrapolation du volume d'entraînement moyen de course à pied en fonction du mois de suivi, pour un athlète et pour un mois d'entraînement de quatre semaines



On constate que, pour la course à pied, le volume d'entraînement est compris entre 6 et 9 heures par mois entre M-7 et M+3. Toutefois, la pratique est plus importante durant les périodes M-9 – M-8 et M+5 – M+6 avec plus de 10 heures par mois.

Figure 3-28a. Représentation du volume d'entraînement total pour les autres activités rapporté en fonction du mois de suivi

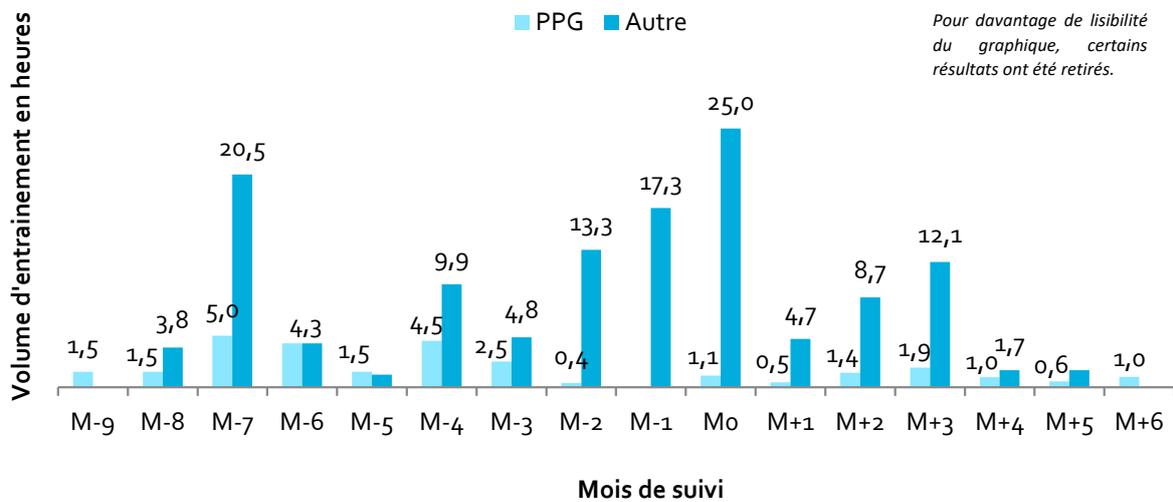
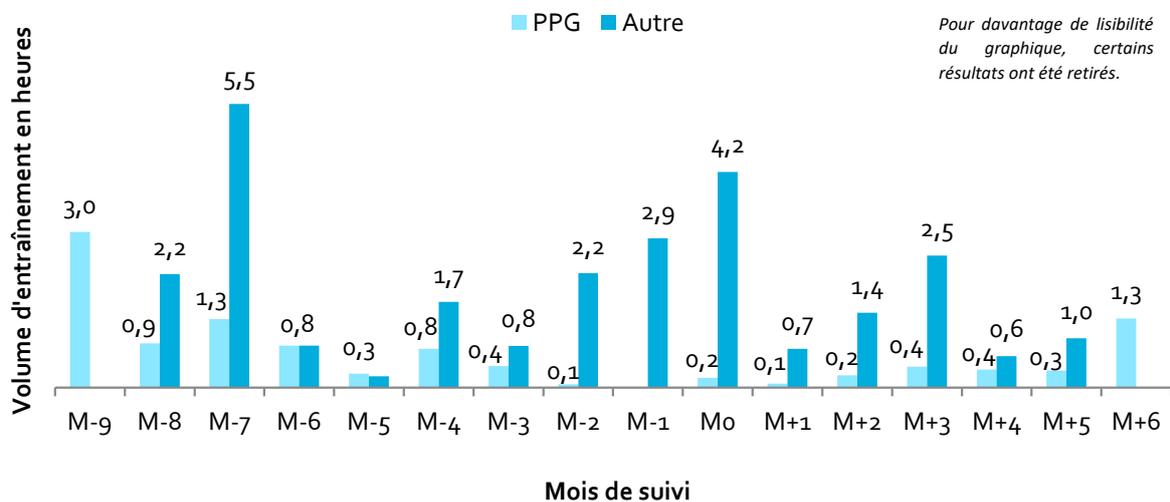


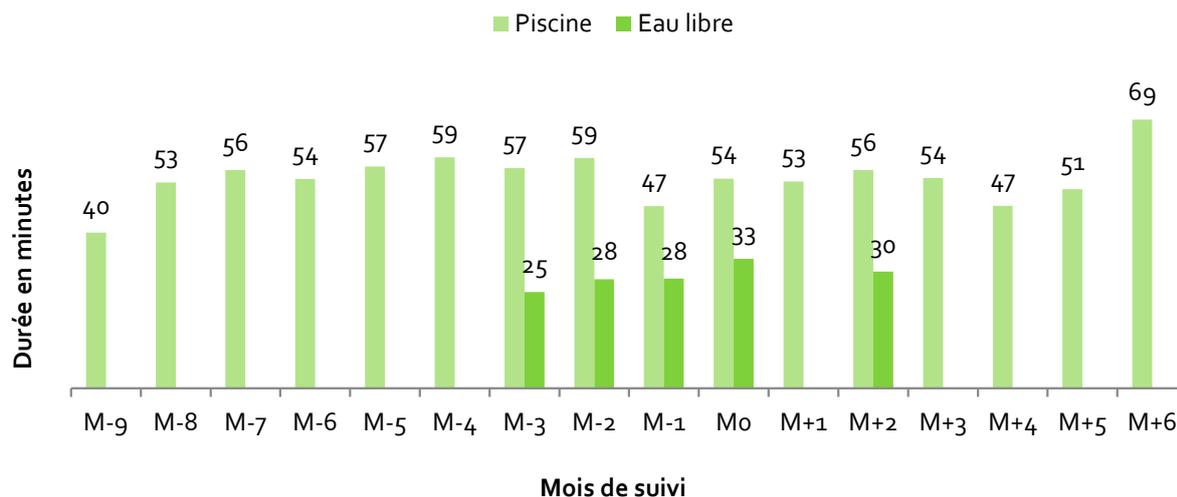
Figure 3-28b. Représentation de l'extrapolation du volume d'entraînement moyen pour les autres activités en fonction du mois de suivi, pour un athlète et pour un mois d'entraînement de quatre semaines



Enfin, on voit que les athlètes font un peu plus de PPG sur la période M-9 – M-7 puis à M+6. Pour les autres activités, on observe un pic à M-7 à 5,5 heures par mois. On constate également deux augmentations progressives : une première de M-3 à M0 passant de 0,8 à 4,2 heures mensuelles puis une seconde de M+1 à M+3 passant de 0,7 à 2,5 heures par mois.

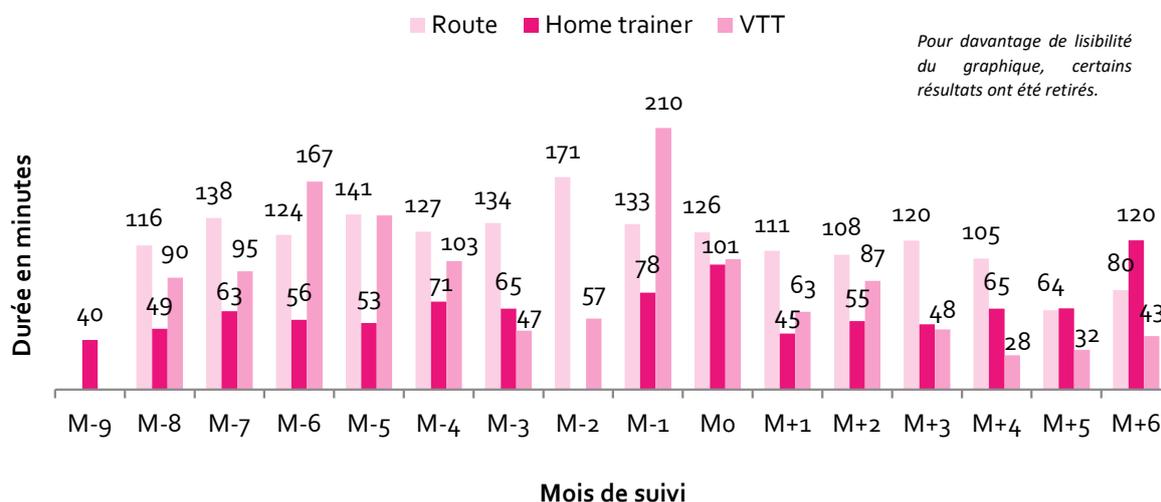
Pour finir, nous proposons une estimation de l'évolution de la durée moyenne d'une séance en fonction du mois de suivi, et pour chaque discipline : natation (**figure 3-29**), vélo (**figure 3-30**), course à pied (**figure 3-31**) et autres activités (**figure 3-32**).

Figure 3-29. Représentation de la durée moyenne en minutes d'une séance de natation en fonction du mois de suivi



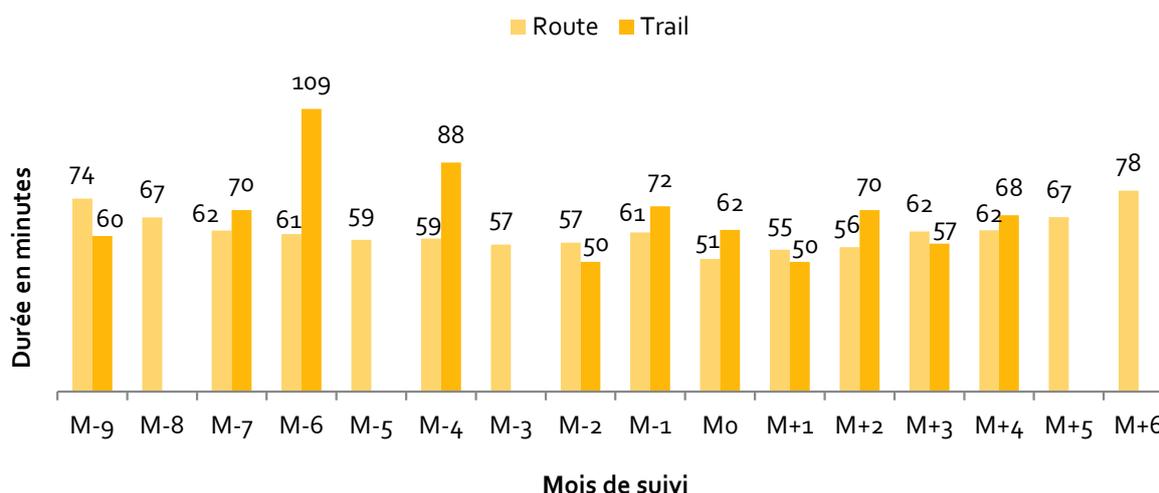
On constate que la durée d'une séance est relativement stable tout au long de la période de suivi, généralement comprise entre 50 et 60 minutes. On note trois mois isolés de décrochage à M-9 (40 min), M-1 (47 min) et M+4 (47 min), ainsi qu'un unique pic à M+6 à 69 minutes.

Figure 3-30. Représentation de la durée moyenne en minutes d'une séance de vélo en fonction du mois de suivi



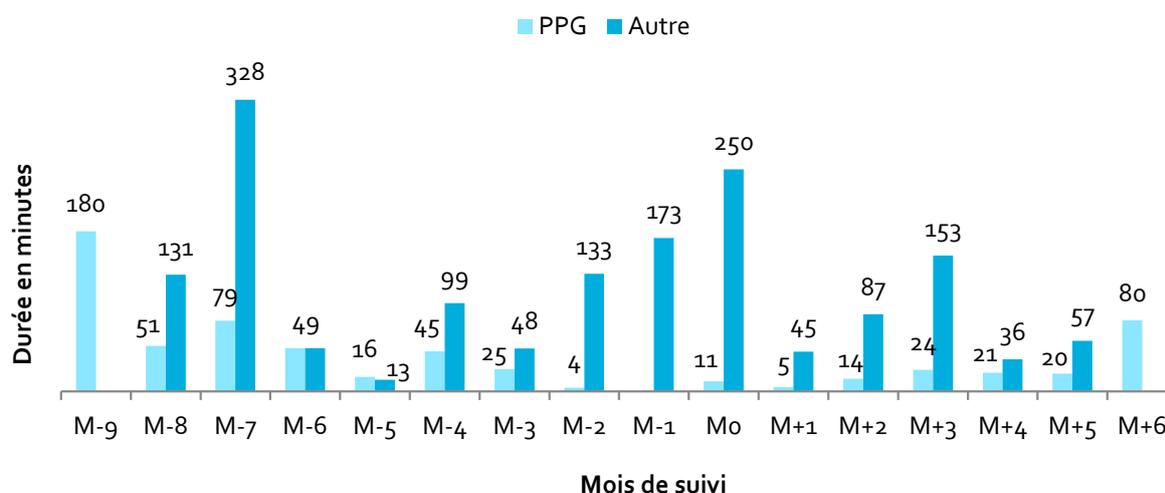
Concernant les séances de vélo, on constate que la durée des séances de cyclisme sur route est généralement supérieure à 120 minutes sur la période M-8 – M0. Ensuite, sur la période M+1 – M+6, la durée diminue passant sous le seuil des deux heures par séance (minimum = 64 minutes à M+5). Pour M-9, on relève l'absence de séance de cyclisme sur route. Pour ce qui est du home trainer, la durée d'une séance est assez variable tout au long de l'année, avec l'absence isolée de séance à M-2. Enfin, pour ce qui est du VTT, la durée d'une séance est encore une fois assez variable tout au long de l'année. On note toutefois deux pics majeurs à M-6 (167 min) et à M-1 (210 min) et l'absence de pratique à M-9 uniquement.

Figure 3-31. Représentation de la durée moyenne en minutes d'une séance de course à pied en fonction du mois de suivi



Concernant la durée d'une séance de course à pied sur route, on observe une décroissance progressive sur la période M-9 – M-2 passant de 74 à 57 minutes. Dans un second temps, cette durée va augmenter progressivement sur la période M0 – M+6 passant de 51 à 78 minutes. La pratique est assez variable tout au long de la période de suivi.

Figure 3-32. Représentation de la durée moyenne en minutes d’une séance pour les autres activités en fonction du mois de suivi



Pour la pratique de la PPG, les séances apparaissent plus longues sur la période M-9 – M-6. La durée des séances est fluctuante pour le reste de la période de suivi. Enfin, pour les autres activités, la durée est elle aussi assez variable. On observe notamment deux pics à M-7 (328 minutes) et à M0 (250 minutes).

Après s’être intéressés aux notions de nombre de séances, de volume horaire d’entraînement et de durée de séance en fonction de la discipline sportive et du mois de suivi – autrement dit aux notions de paramètres quantitatifs, nous allons aborder dans le paragraphe suivant les aspects davantage qualitatifs de l’entraînement.

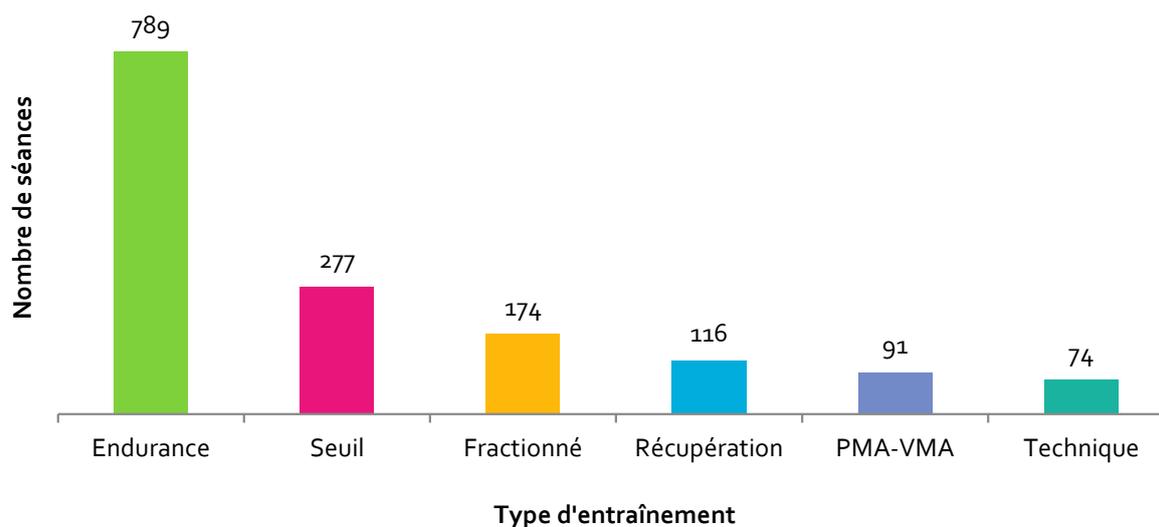
B. Analyse qualitative de l'entraînement

1. Analyse globale

Dans cette partie, nous allons nous intéresser davantage au type de séance réalisé – récupération, technique, endurance, seuil, fractionné, PMA-VMA – dans les trois disciplines, et en fonction de la saison sportive.

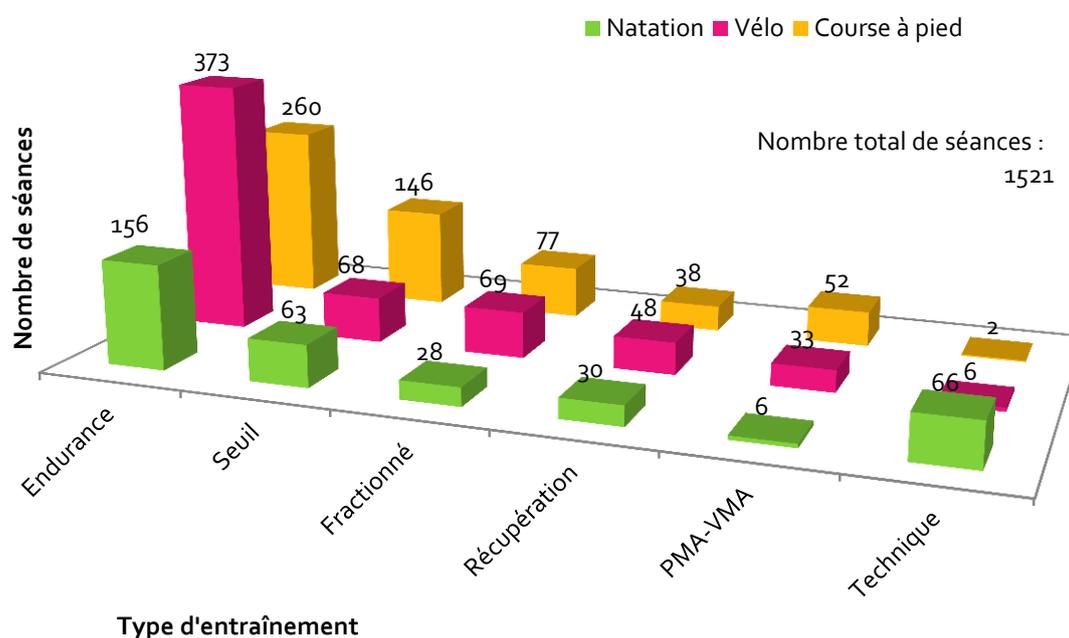
La **figure 3-33** montre la répartition du nombre de séances étudiées en fonction du type de séance, à laquelle s'ajoute le type de discipline pratiquée (natation, vélo, course à pied) sur la **figure 3-34**.

Figure 3-33. Représentation du nombre de séances rapportées au cours de la période de suivi, en fonction du type de séance réalisé



On constate que la majorité des séances est dédiée à des séances d'endurance (51,9 % du nombre de séances rapportées par nos volontaires). Viennent ensuite les séances dites de seuil qui ne représentent que 18,2 % du panel total étudié. En dernière position, on retrouve les séances de technique et leur 4,9 %.

Figure 3-34. Représentation du nombre de séances rapportées au cours de la période de suivi, en fonction du type de séance réalisé et de la discipline pratiquée



On remarque que le vélo est la discipline via laquelle nos athlètes ont pratiqué le plus de séances d'endurance mais également de récupération. La natation semble être la discipline pour laquelle les séances de technique sont les plus nombreuses, tandis que la course à pied apparaît comme la discipline la plus représentée pour réaliser les séances au seuil mais également de fractionné et de VMA.

La **figure 3-35a** présente le volume d'entraînement étudié toujours en fonction du type de séance. Une fois de plus, ce sont les séances d'endurance qui représentent le plus gros volume d'entraînement étudié soit 55,6 % du volume d'entraînement total. L'ordre de prédominance est le même que celui affiché sur la **figure 3-33**. Mais il est également utile de présenter les proportions de temps étudié, dédié à chaque type de séance (**figure 3-35b**). On constate que plus de la moitié du temps passé à s'entraîner (56 %) est allouée aux séances en endurance. Environ 30 % du temps est destiné aux séances au seuil et de fractionné, tandis que les 14 % restants environ sont attribués aux autres types d'entraînement.

Figure 3-35a. Représentation du volume horaire d'entraînement rapporté au cours de la période de suivi, en fonction du type de séance réalisé

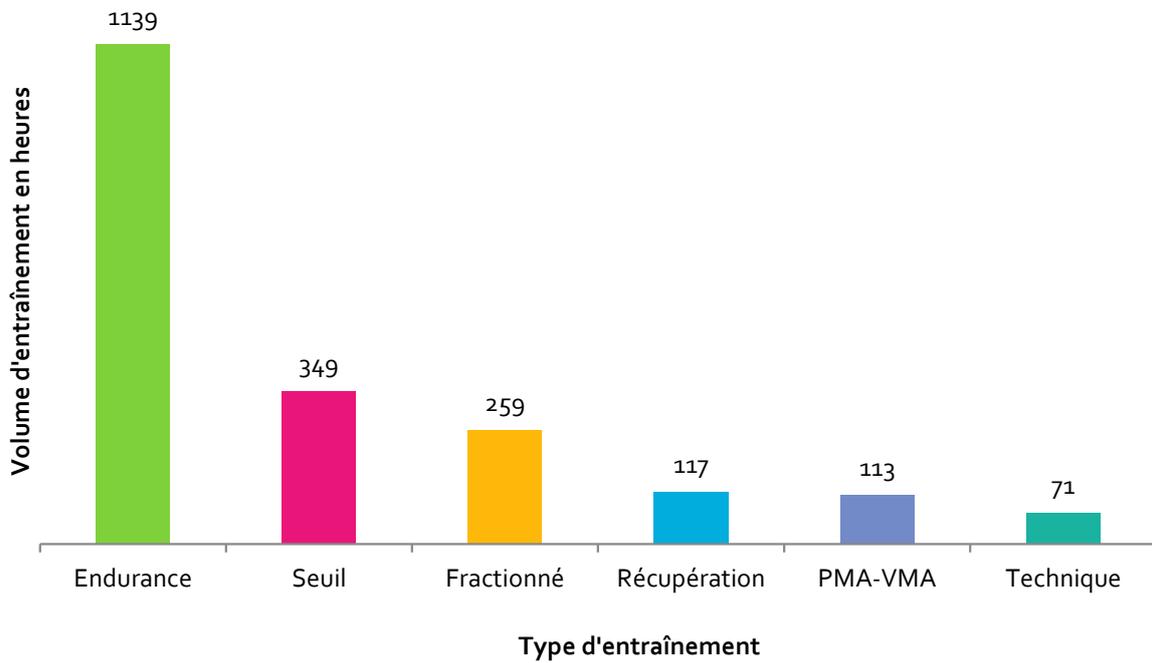
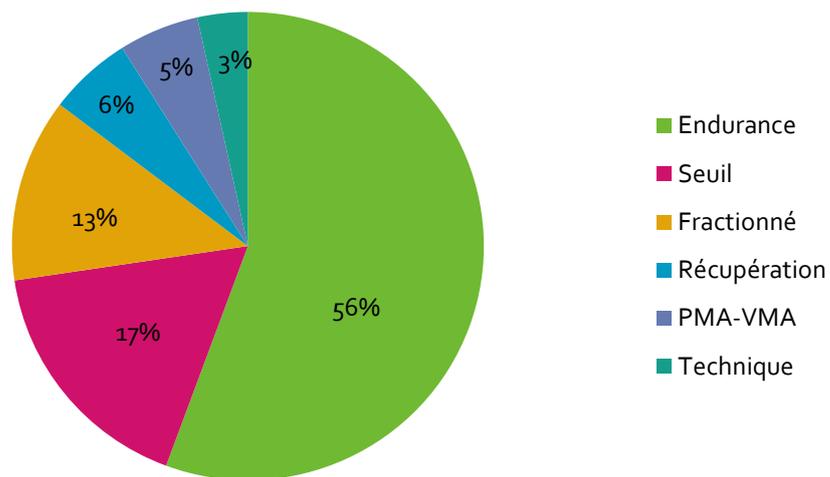
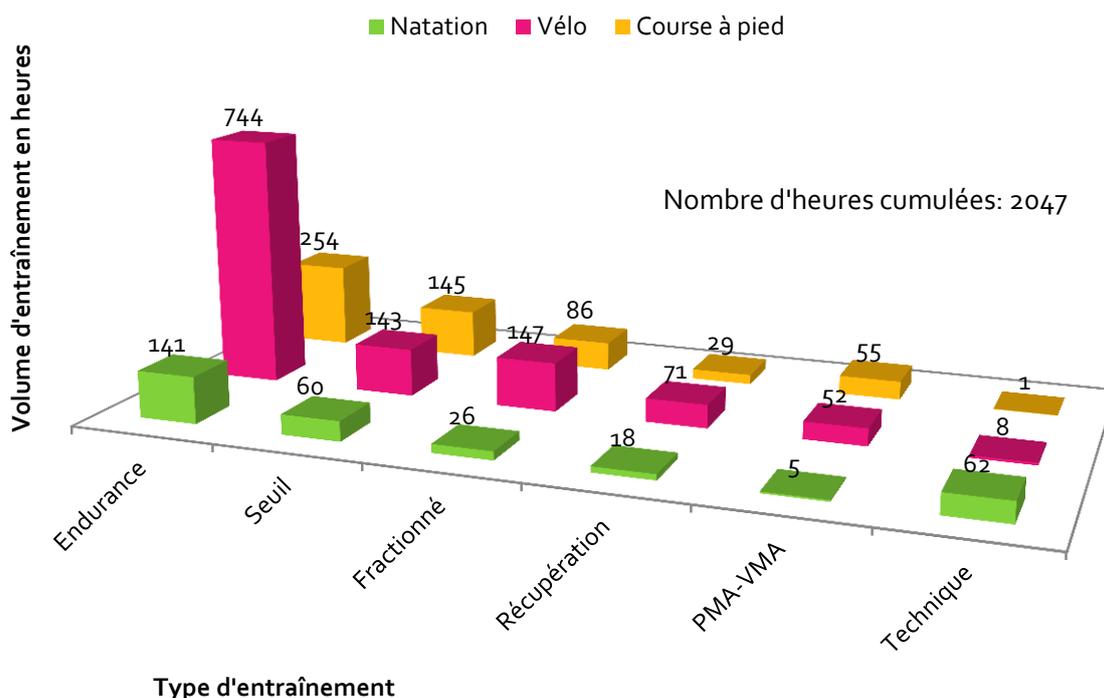


Figure 3-35b. Répartition en pourcentage de temps passé pour chaque type de séance au cours de la période de suivi



La figure suivante – la **figure 3-36a** – illustre ces mêmes données de volume d’entraînement étudié en fonction du type de séance, mais réparties en fonction de la discipline pratiquée.

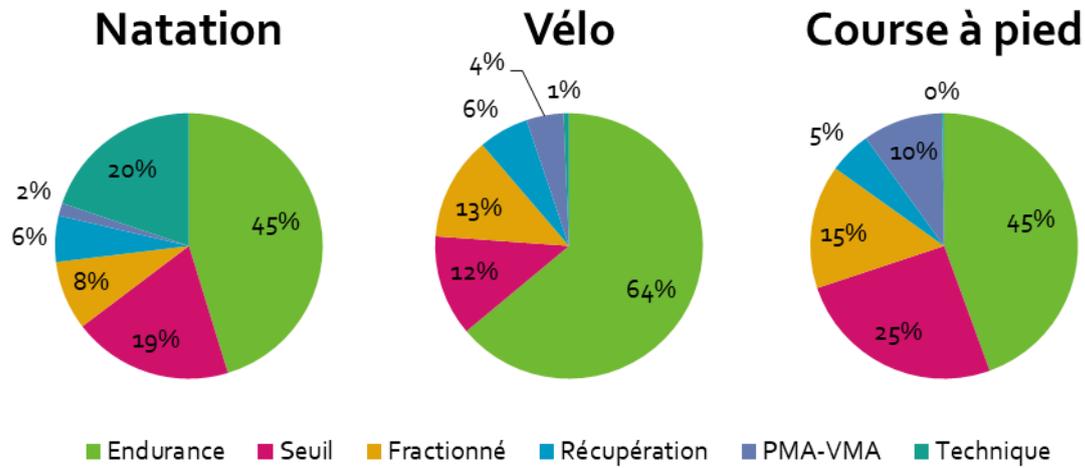
Figure 3-36a. Représentation du volume horaire d’entraînement rapporté au cours de la période de suivi, en fonction du type de séance réalisé et de la discipline pratiquée



Une fois encore, on remarque que le vélo est la discipline pour laquelle nos athlètes ont déclaré le plus gros volume d’entraînement pour les séances en endurance – soit 744 heures et 36,3 % du volume total d’entraînement étudié – mais également pour les séances de récupération – soit 71 heures et 3,5 %. Les autres observations remarquables sont superposables à celles formulées pour la **figure 3-34**.

La figure suivante – la **figure 3-36b** – représente ces données de volume d’entraînement étudié mais sous la forme de pourcentage du volume global, toujours en fonction du type de séance et de la discipline pratiquée.

Figure 3-36b. Répartition en pourcentage de temps passé pour chaque type de séance au cours de la période de suivi, en fonction de la discipline pratiquée

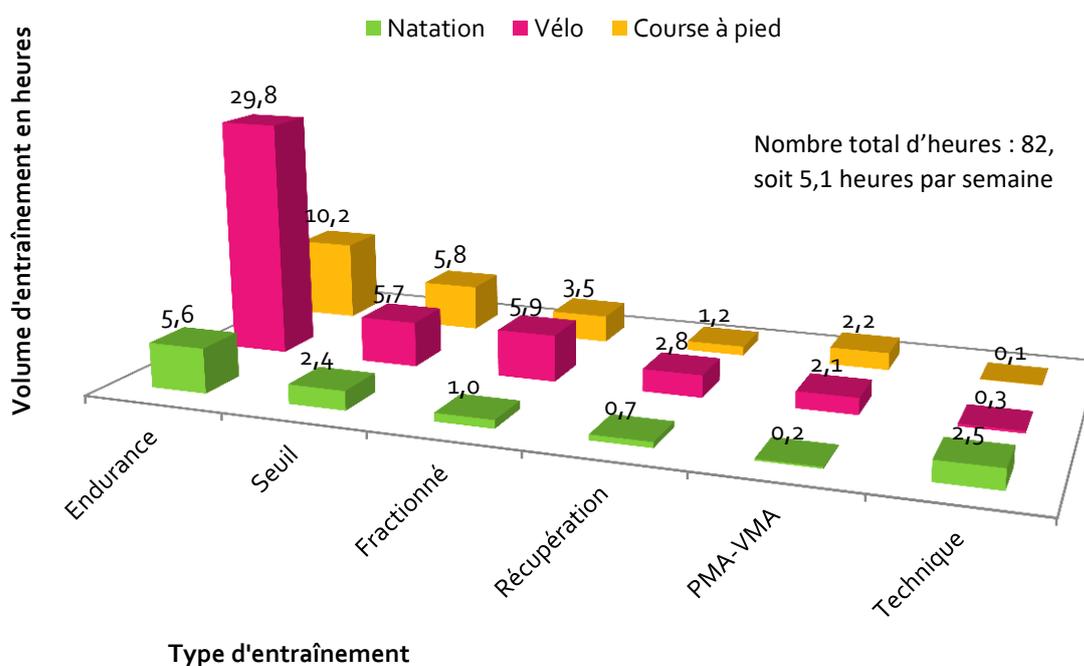


On constate que la proportion de temps passé pour les séances en endurance représente 64 % du volume d'entraînement total étudié alloué à la pratique du vélo, et redescend à 45 % pour les deux autres disciplines. Les séances au seuil et de fractionné représentent 25 % du temps d'entraînement passé sur le vélo et 40 % pour celui de course à pied. Seul le pourcentage de temps de séance pour la technique fait figure d'exception et uniquement pour la natation, avec ses 20 % de temps passé.

Pour finir, nous proposons une extrapolation des données de volume d'entraînement selon la méthode décrite un peu plus tôt (**figure 3-37**).

Figure 3-37. Représentation de l'estimation du volume d'entraînement moyen pour chaque type de séance et en fonction de la discipline pratiquée, pour un athlète et pour une semaine d'entraînement par mois au cours de la période de suivi

Cette estimation du volume d'entraînement correspond à l'addition de seize semaines d'entraînement « type » de 5,1 heures hebdomadaires en moyenne.



Cette estimation montre en quelque sorte le volume d'entraînement moyen déclaré par chaque athlète ayant fourni des données d'entraînement sur les 16 mois de suivi. Il serait toutefois plus pertinent de s'intéresser à ces mêmes données mais en fonction de la saison sportive. En effet, la temporalité et la saisonnalité dans notre région peuvent impacter la structure de l'entraînement.

C'est pourquoi nous proposons dans le prochain paragraphe d'analyser nos données d'entraînement en fonction de la discipline et du type de séance au cours de la saison sportive mais, en plus, en fonction du mois de suivi.

2. Analyse par mois

Tout d'abord, nous présentons dans la **figure 3-38a** le nombre de séances étudiées sur la période de suivi en fonction du mois de suivi et du type d'entraînement. La **figure 3-38b** représente une extrapolation de ces données selon la méthode expliquée dans le paragraphe I.A de cette troisième partie dédiée aux résultats.

Figure 3-38a. Représentation du nombre total de séances d'entraînement rapportées en fonction du type de séance et du mois de suivi

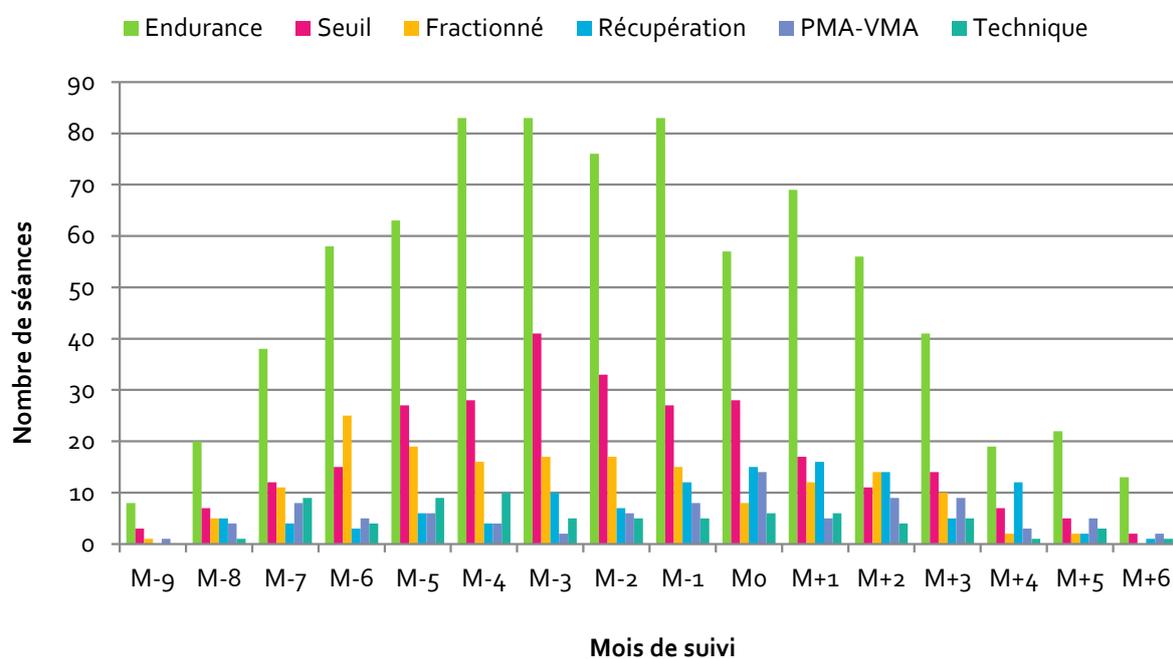
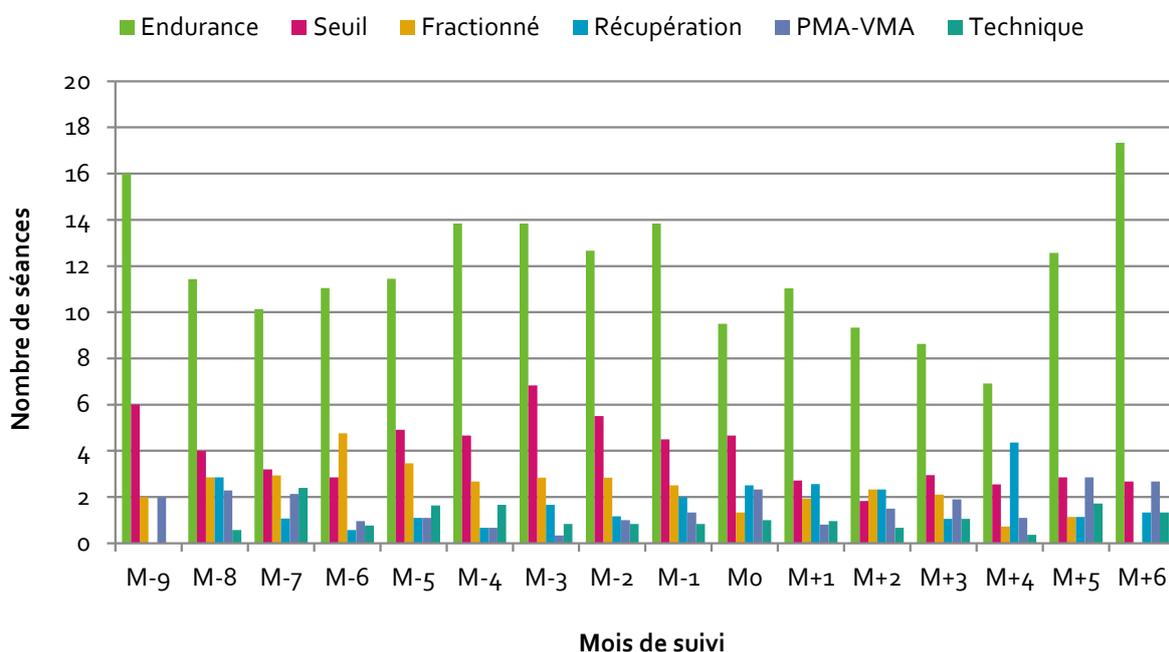


Figure 3-38b. Représentation de l'extrapolation du nombre de séances en fonction du type de séance, pour un athlète et pour un mois d'entraînement de quatre semaines



On constate que le nombre extrapolé de séances en endurance observe deux pics : un durant les mois M-9 et M+6, et un autre un peu moins élevé sur la période M-4 – M-1. Cette tendance semble quelque peu similaire pour les séances au seuil tandis que les séances de fractionné montrent un pic isolé à M-6 puis une décroissance progressive jusqu'à M0. Pour les autres types de séances, il n'y a pas de tendance qui se dégage nettement.

Nous pourrions proposer ce même travail pour chaque discipline mais il semble, à ce niveau, davantage pertinent de raisonner en volume horaire d'entraînement, et non en nombre de séances. C'est pourquoi, nous proposons de passer à la **figure 3-39a** qui représente le volume horaire d'entraînement total étudié en fonction du type de séance et du mois de suivi. On propose, en parallèle, son extrapolation en termes de volume horaire (**figure 3-39b**) mais également en termes de pourcentage de temps passé par rapport au temps total d'entraînement mensuel (**figure 3-39c**).

Figure 3-39a. Représentation du volume d'entraînement total en heures rapporté au cours de la période de suivi, en fonction du type de séance et du mois de suivi

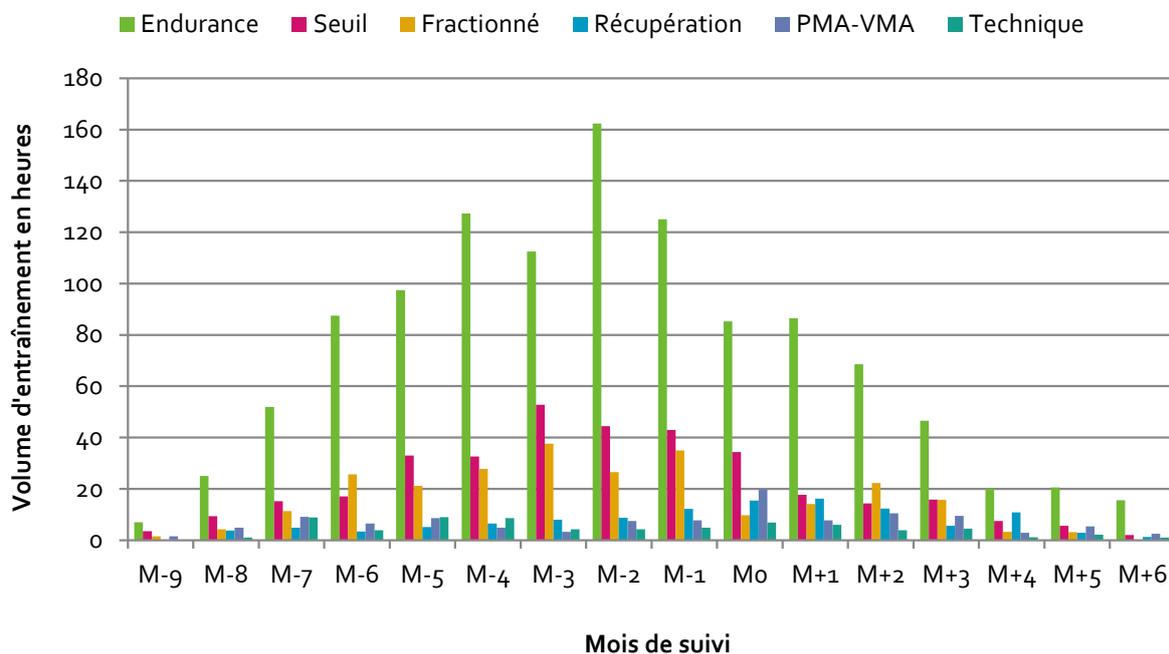


Figure 3-39b. Représentation de l'extrapolation du volume d'entraînement en heures en fonction du type de séance et du mois de suivi, pour un athlète et pour un mois d'entraînement de quatre semaines

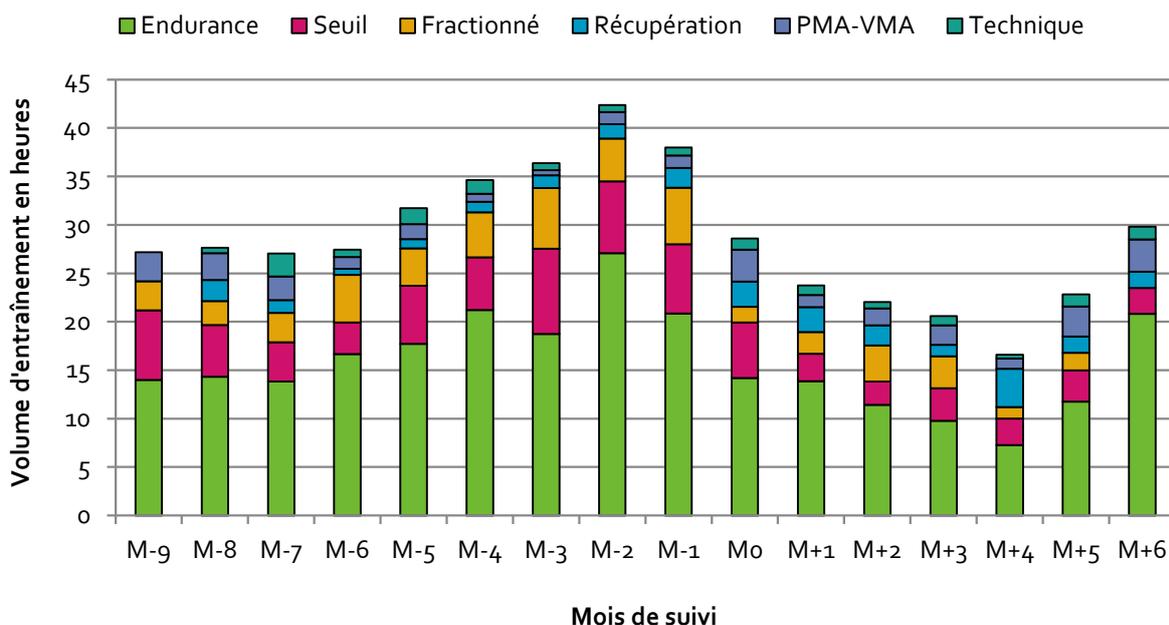
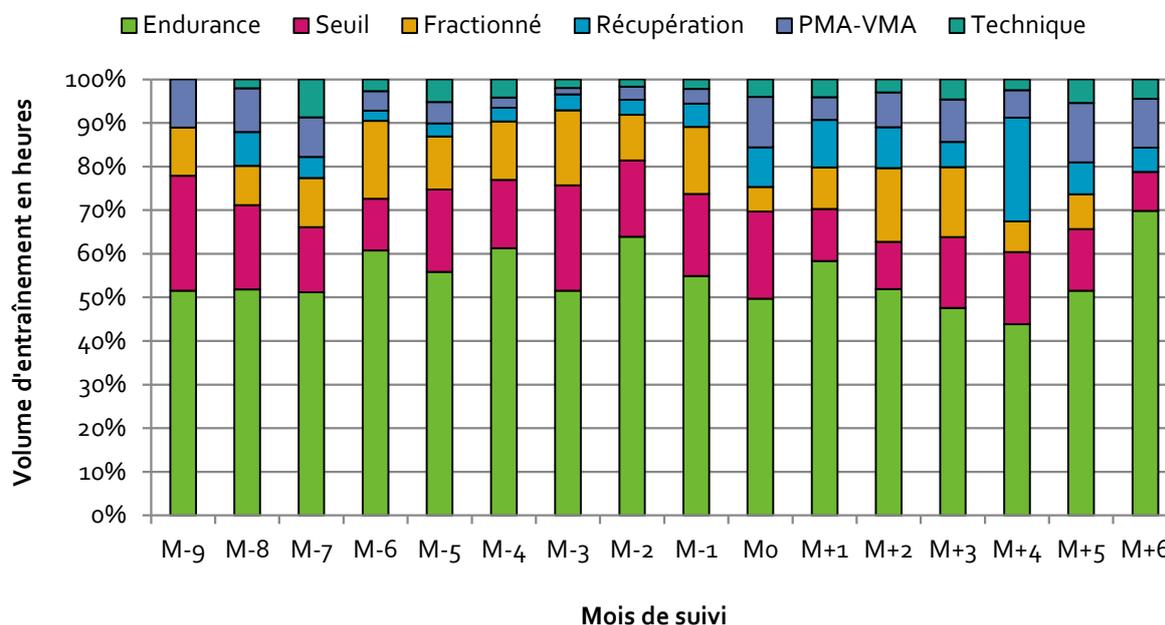


Figure 3-39c. Représentation de l'extrapolation du volume d'entraînement relatif en fonction du type de séance et du mois de suivi, pour un athlète et pour un mois d'entraînement de quatre semaines



D'après ces deux dernières figures, on constate un plateau de pratique en termes de volume horaire durant la période M-9 – M-6, autour de 27 heures mensuelles d'entraînement. On observe ensuite une augmentation progressive du volume pour atteindre un pic de 42 heures environ à M-2 puis pour ensuite diminuer progressivement jusqu'à M+4 et atteindre un volume d'entraînement de 16 heures mensuelles environ, ce qui représente un minimum sur la période étudiée.

D'un point de vue global, la pratique en endurance représente environ la moitié du volume horaire mensuel voire plus, en fonction du mois de suivi. Le volume que représentent les séances au seuil et de fractionné apparaît plus important durant la première partie du suivi, c'est-à-dire de M-9 à M0, que ce soit en valeur absolue ou en valeur relative (entre 20 et 30 % environ).

Nous proposons une étude similaire mais en fonction de chacune des disciplines sportives – natation (**figure 3-40**), vélo (**figure 3-41**), course à pied (**figure 3-42**) – avec une présentation des données brutes de volume horaire d'entraînement (**a**) et son extrapolation en valeur absolue (**b**). Les figures notées **c** illustrent cette même extrapolation mais en valeur relative.

Figure 3-40a. Représentation pour la natation du volume horaire d'entraînement rapporté au cours de la période de suivi, en fonction du type de séance et du mois de suivi

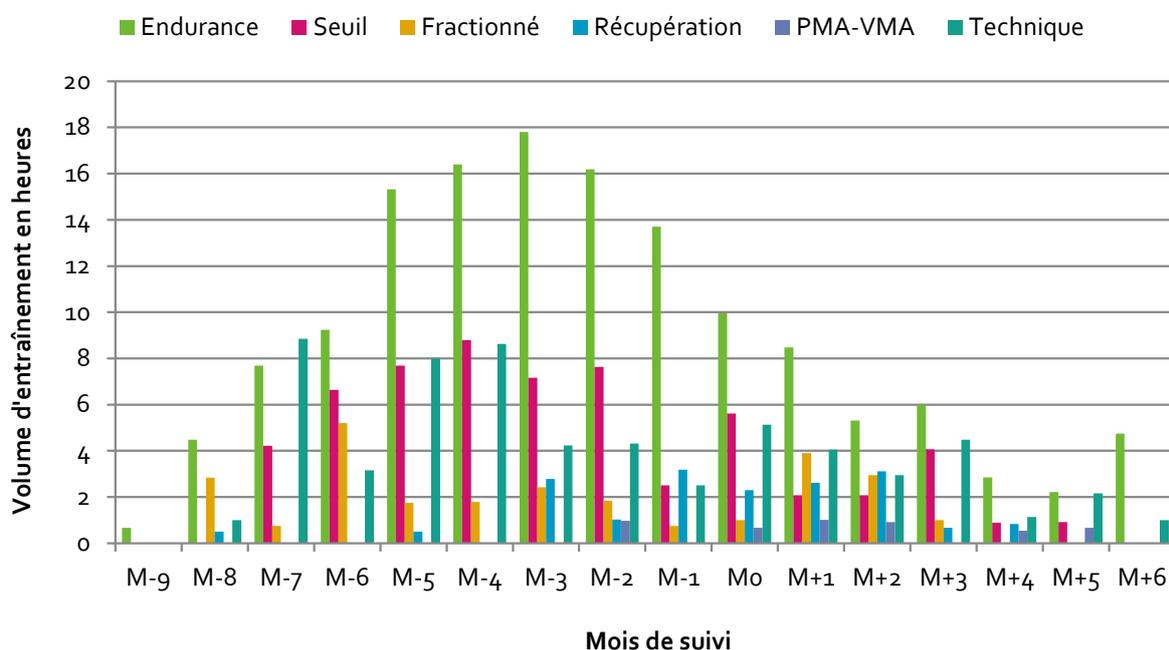


Figure 3-40b. Représentation pour la natation de l'extrapolation du volume d'entraînement en heures en fonction du type de séance et du mois de suivi, pour un athlète et pour un mois d'entraînement de quatre semaines

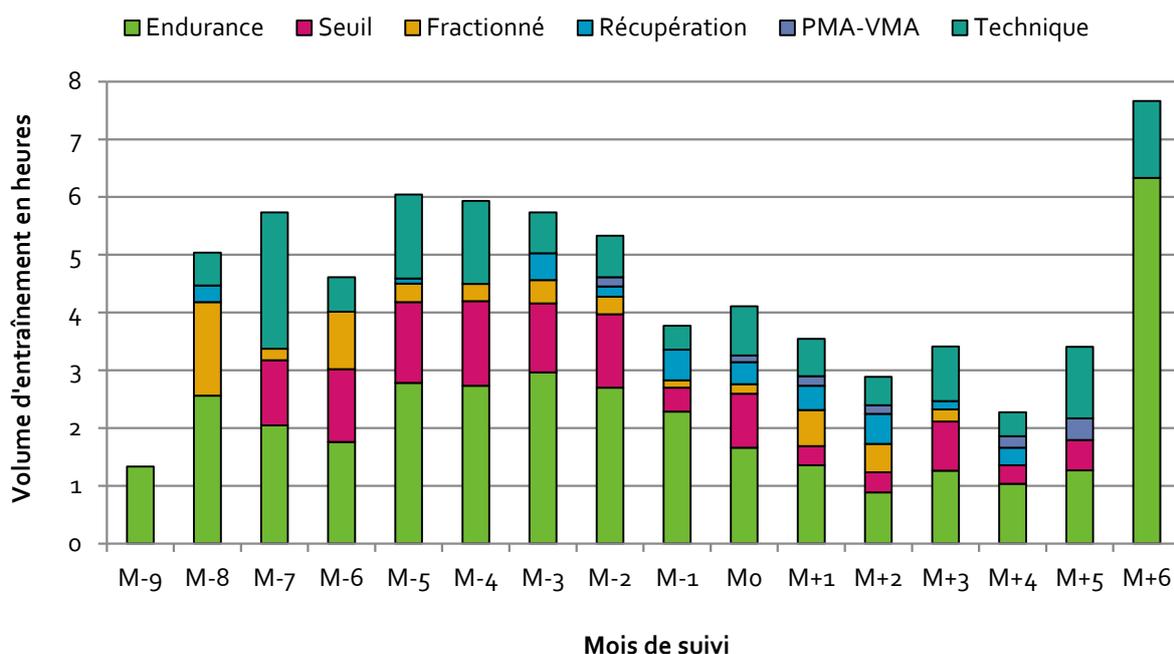
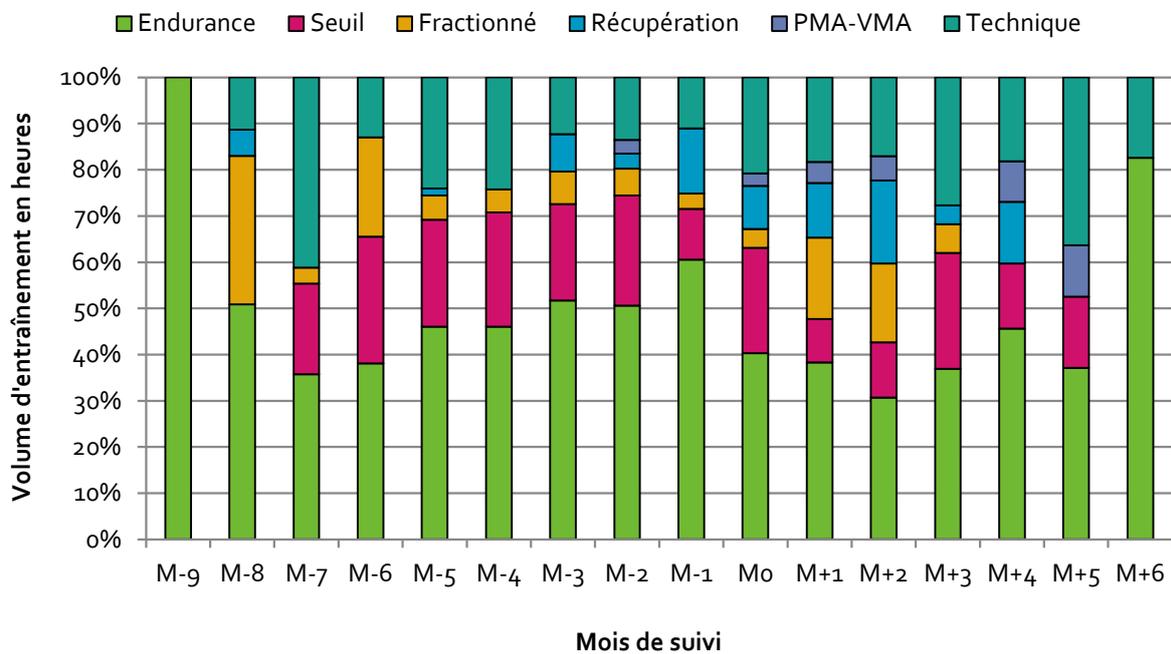


Figure 3-40c. Représentation pour la natation de l'extrapolation du volume d'entraînement relatif en fonction du type de séance et du mois de suivi, pour un athlète et pour un mois d'entraînement de quatre semaines



Concernant la natation, il apparaît que la majeure partie de la pratique a lieu durant la période M-8 à M-4, pour ensuite diminuer progressivement jusqu'à M+4. Le volume horaire n'excède généralement pas les 6 heures mensuelles, exception faite de ce pic à M+6.

Les séances en endurance représentent tout au plus 50 % du volume d'entraînement, exception faite de trois pics à M-9, M-1 et M+6. On constate également qu'une partie de l'entraînement est dédiée aux séances de seuil, notamment entre M-7 et M0 avec une proportion de 20 à 30 % du volume horaire total environ. Enfin, on remarque que la technique occupe une place importante dans cette discipline et, ce tout au long de l'année (entre 10 et 25 % en moyenne, voire jusque 40 % du volume d'entraînement total dédié à la natation).

Figure 3-41a. Représentation pour le vélo du volume horaire d'entraînement rapporté au cours de la période de suivi, en fonction du type de séance et du mois de suivi

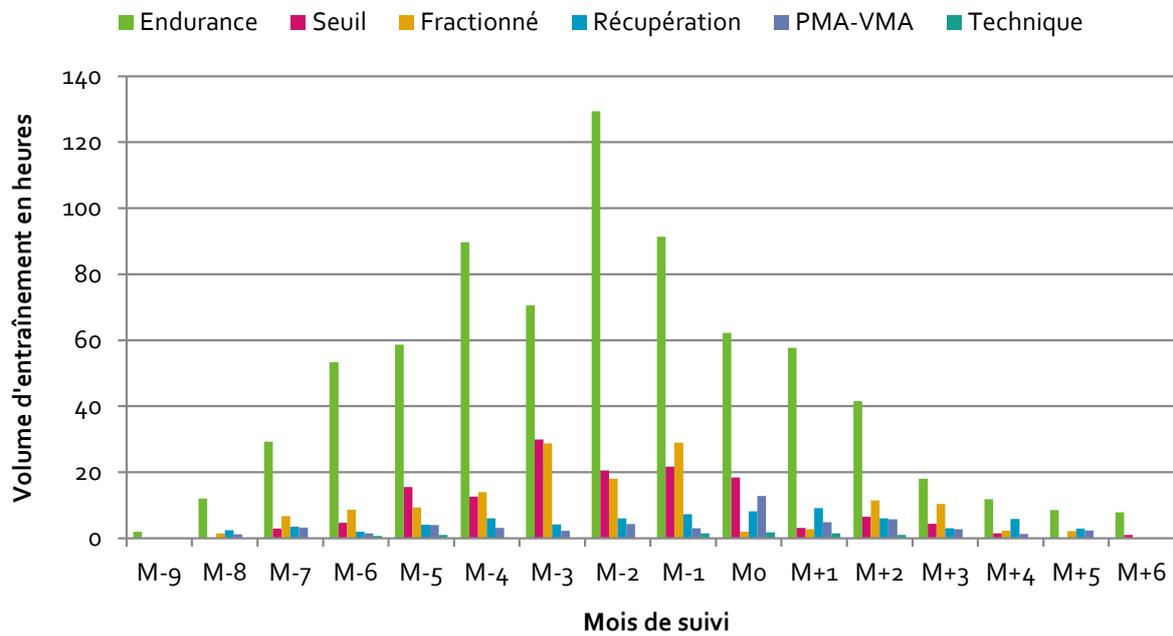


Figure 3-41b. Représentation pour le vélo de l'extrapolation du volume d'entraînement en heures en fonction du type de séance et du mois de suivi, pour un athlète et pour un mois d'entraînement de quatre semaines

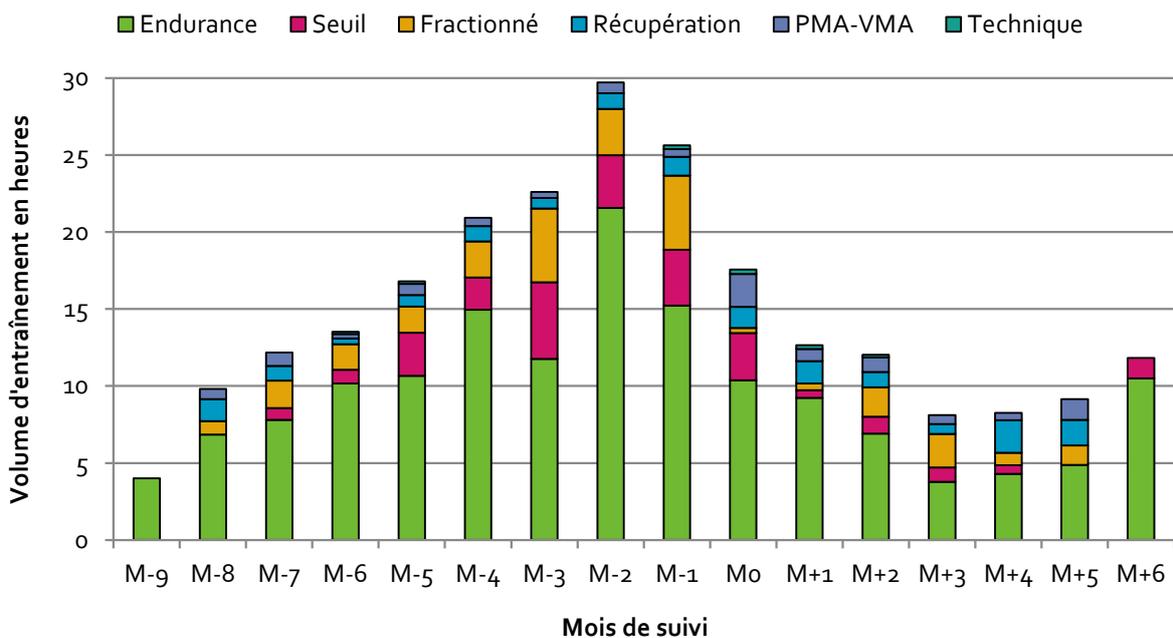
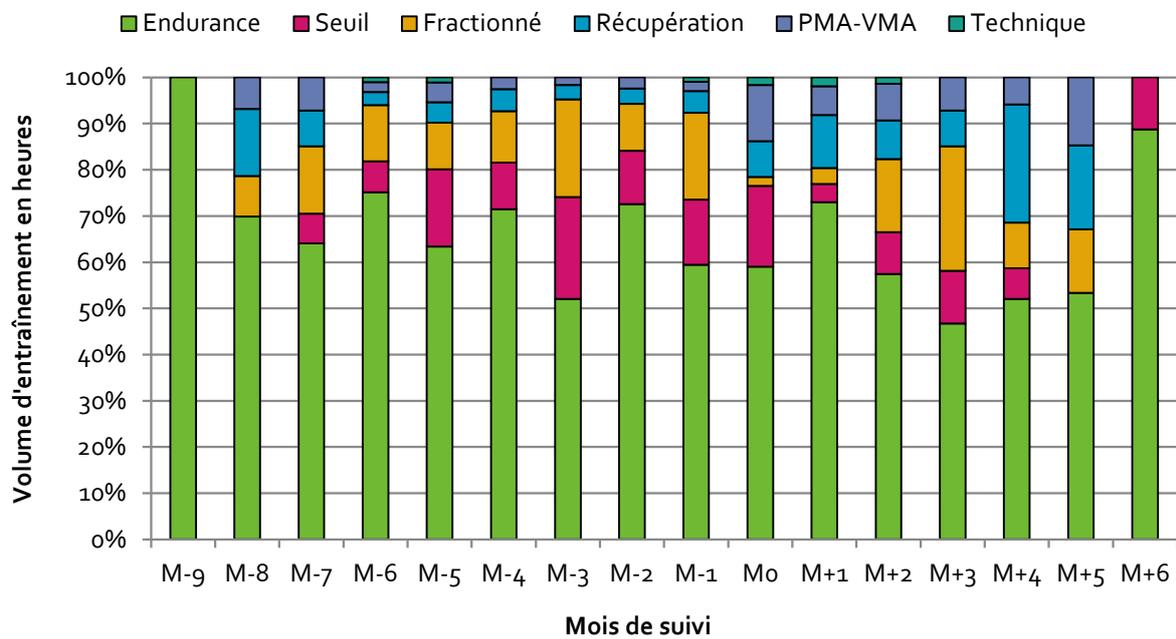


Figure 3-41c. Représentation pour le vélo de l’extrapolation du volume d’entraînement relatif en fonction du type de séance et du mois de suivi, pour un athlète et pour un mois d’entraînement de quatre semaines



Pour le vélo, on constate que le volume horaire d’entraînement augmente progressivement à partir de M-8 pour atteindre un pic à M-2 à près de 30 heures mensuelles. Puis il diminue un peu plus rapidement jusqu’à un minimum d’environ sept heures à M+3. On observe également une stabilité de la pratique en matière de volume horaire d’entraînement sur le période M+3 – M+5.

En termes de volume relatif, il apparaît que les séances en endurance représentent au moins 50 % du temps de pratique pour l’ensemble de la période de suivi. Cette proportion est variable au cours de la saison en fonction des volumes dédiés aux autres types de séances, sans tendance qui se détache.

Figure 3-42a. Représentation pour la course à pied du volume horaire d'entraînement rapporté au cours de la période de suivi, en fonction du type de séance et du mois de suivi

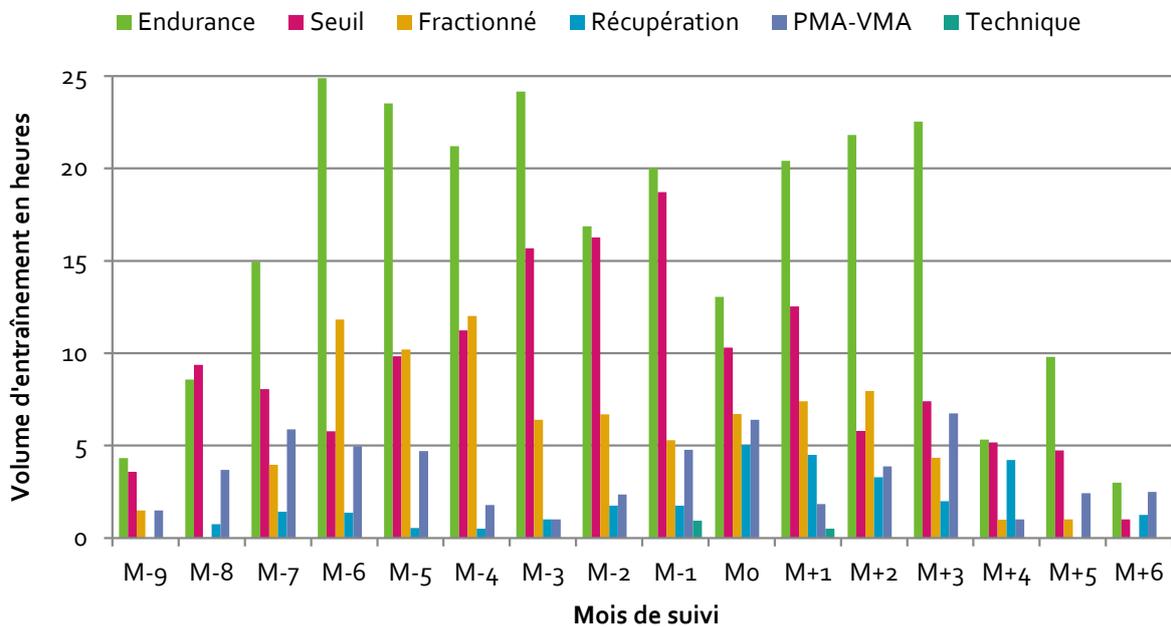


Figure 3-42b. Représentation pour la course à pied de l'extrapolation du volume d'entraînement en heures en fonction du type de séance et du mois de suivi, pour un athlète et pour un mois d'entraînement de quatre semaines

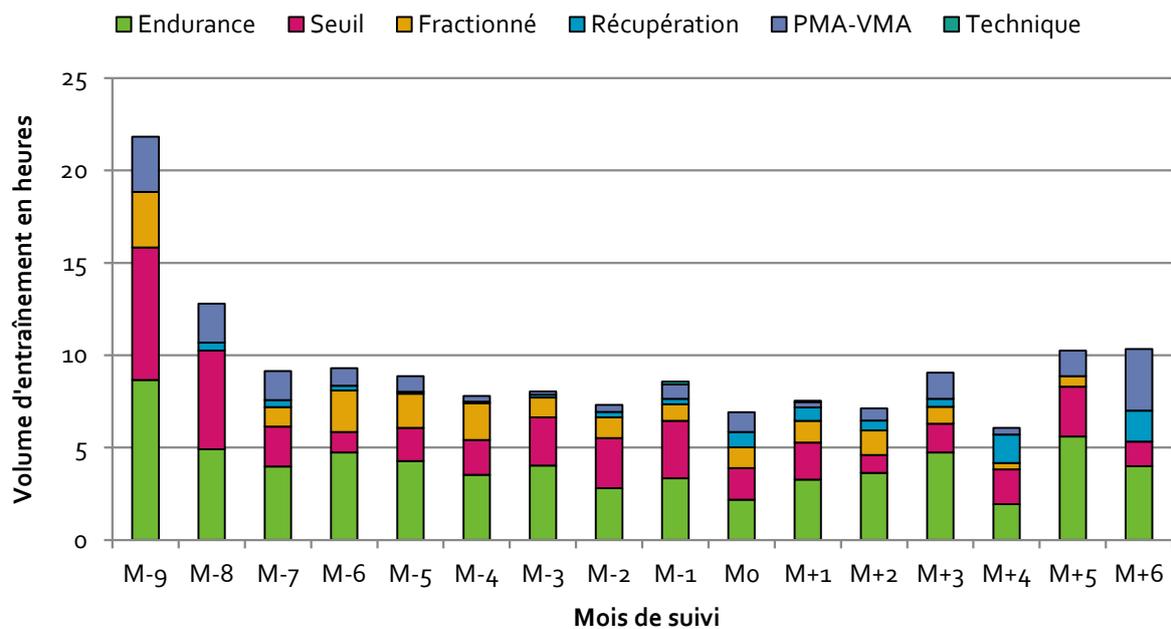
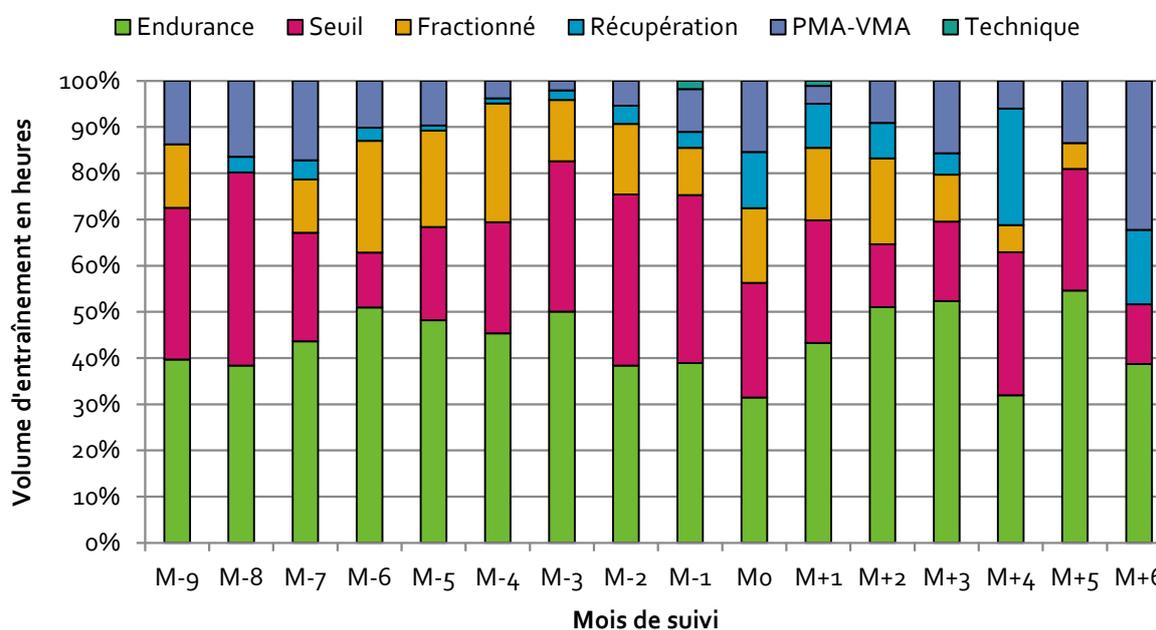


Figure 3-42c. Représentation pour la course à pied de l'extrapolation du volume d'entraînement relatif en fonction du type de séance et du mois de suivi, pour un athlète et pour un mois d'entraînement de quatre semaines

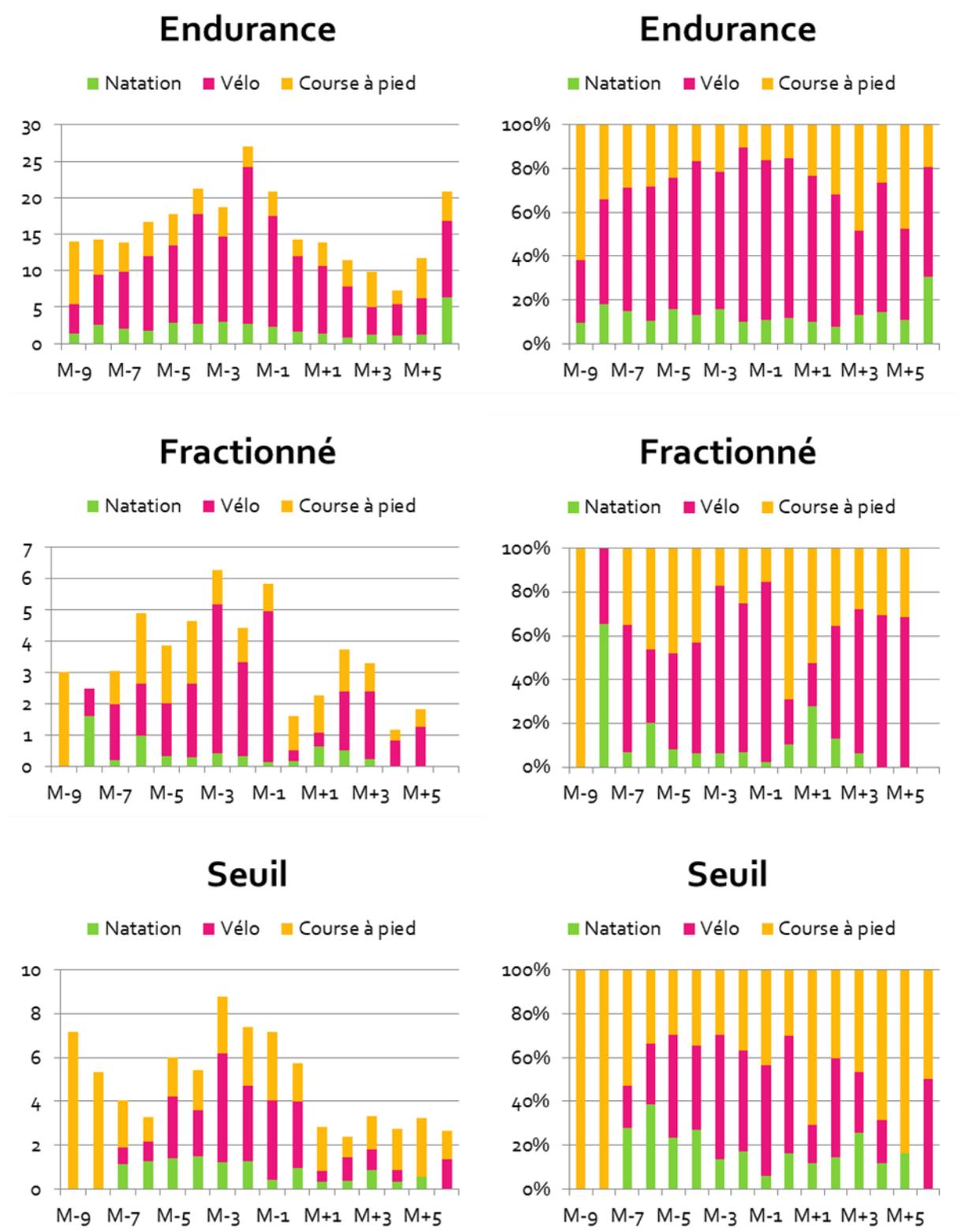


Hormis un pic de pratique à M-9 et M-8, la course à pied représente généralement moins de dix heures d'entraînement mensuel, montrant ainsi une certaine stabilité au cours de la période de suivi. On constate que la pratique en endurance représente le plus souvent moins de 50 % du volume d'entraînement total, ou à peine plus (< 55 %). Il semble que les séances de seuil – les moins importantes en termes de pourcentage de volume de pratique – correspondent à un pourcentage de temps évoluant entre 15 et 30 % sur la période considérée, sans tendance nette.

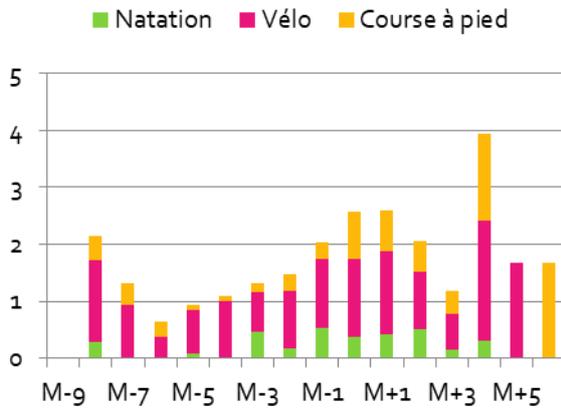
Dans la partie suivante, nous allons cette fois-ci nous intéresser à la part de chaque discipline sportive pour chaque type de séance et en fonction du mois de suivi. La **figure 3-43** indique les valeurs extrapolées selon la méthode décrite dans le paragraphe I.A de cette troisième partie (à gauche) ainsi que la proportion de temps que chaque discipline représente en fonction du mois de suivi (à droite).

L'axe des ordonnées représente le volume horaire extrapolé (à gauche) et le pourcentage de temps passé par rapport au temps total d'entraînement (à droite), tandis que l'axe des abscisses représente le mois de suivi sur la période d'étude.

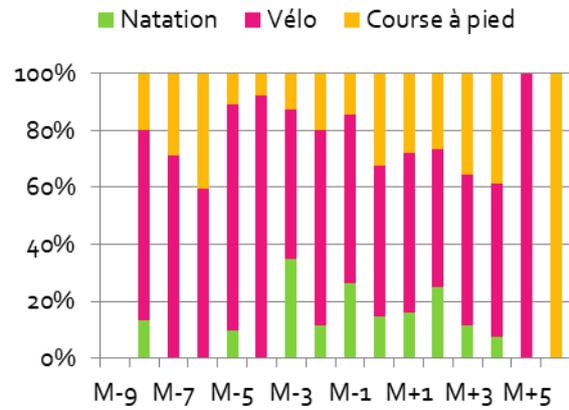
Figure 3-43. Représentation de l'extrapolation du volume d'entraînement en heures (à gauche) et de la proportion de temps passé (à droite), pour chaque discipline et en fonction du mois de suivi, pour un athlète et pour un mois d'entraînement de quatre semaines



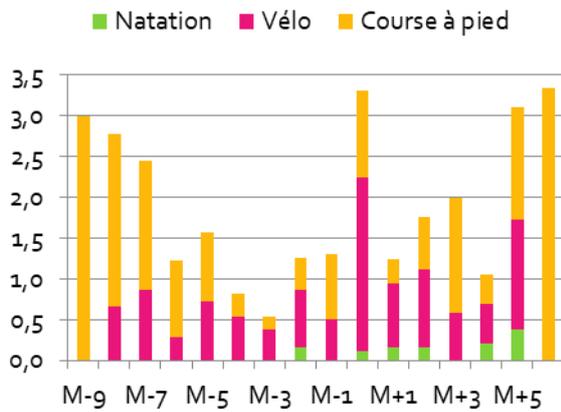
Récupération



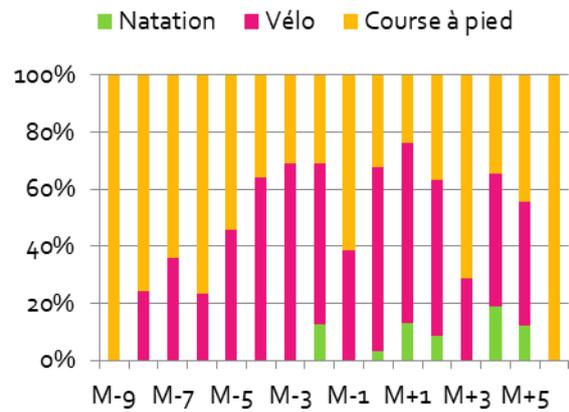
Récupération



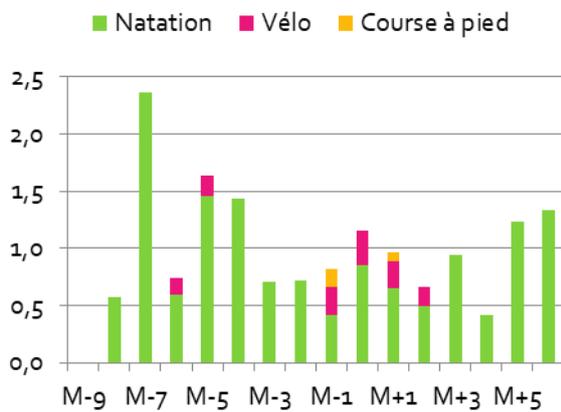
PMA-VMA



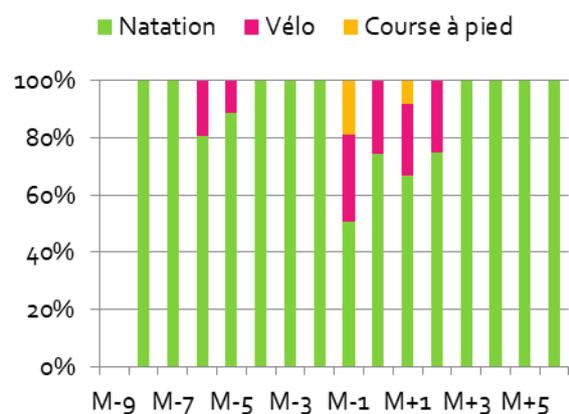
PMA-VMA



Technique



Technique



Concernant les séances d'endurance, on constate que pour quasiment l'ensemble des mois de suivi, le volume d'entraînement est d'au moins 10 heures par mois et augmente progressivement jusqu'à M-2 avec un peu plus de 25 heures mensuelles, pour diminuer ensuite jusqu'à M+4. Sur la période M-6 – M+2, on remarque qu'environ 60 % du temps de pratique sont dédiés au vélo. La proportion destinée à la course à pied est plus importante durant les périodes M-6 – M-5 et M+5 – M+6, avec entre 20 et 45 % du temps de pratique pour ce type de séance, tandis que cette proportion dédiée à la natation reste relativement stable tout au long de l'année.

Les séances de seuil représentent un volume horaire compris entre 4 et 9 heures mensuelles sur la période M-6 – M-1, avec un passage sous la barre des quatre heures en période M+1 – M+4. Il existe également un pic de pratique sur la période M+9 – M+8. Ce type de séance semble davantage plébiscité en course à pied et durant les périodes M-9 – M-8 et M+5 – M+6, alors que 40 à 50 % du temps dédié est réalisé à vélo sur la période M-5 – M0.

Pour le fractionné, on constate que son recours est assez fluctuant. On observe cependant une période davantage dédiée, s'étalant entre M-9 et M-1, avec un volume mensuel oscillant entre 3 et 6 heures. La pratique est moins prononcée après M0, passant sous la barre des quatre heures. Globalement et au vu des chiffres relevés, le vélo semble préféré pour réaliser les séances de fractionné dans les trois mois qui précèdent l'objectif principal durant M0, ou dans les trois à six mois qui lui succèdent. Toutefois, en fonction des mois, cette proportion d'entraînement dédiée aux séances de fractionné est plus importante pour la course à pied.

En ce qui concerne la récupération, le volume horaire dédié à ce type de séance croît progressivement jusqu'à M0 – M+1, en restant toutefois sous la barre des trois heures mensuelles en général. On note un pic à M+4 avec quasiment quatre heures mensuelles. Néanmoins, le vélo encore une fois préféré pour réaliser ce type de séance, dont le volume relatif est d'au moins 50 % du volume total et ce, quel que soit le mois de suivi.

Pour continuer avec la PMA-VMA, il apparaît que ce type de séance est surtout utilisé durant les périodes M-9 – M-7 et M+5 – M+6. On observe toutefois un petit pic à M0, avoisinant les 3,5 heures de pratique mensuelle. La tendance est au recours préférentiel à la course à pied et au vélo pour ce type de séance, la proportion entre les deux dépendant du mois de suivi sans tendance nette.

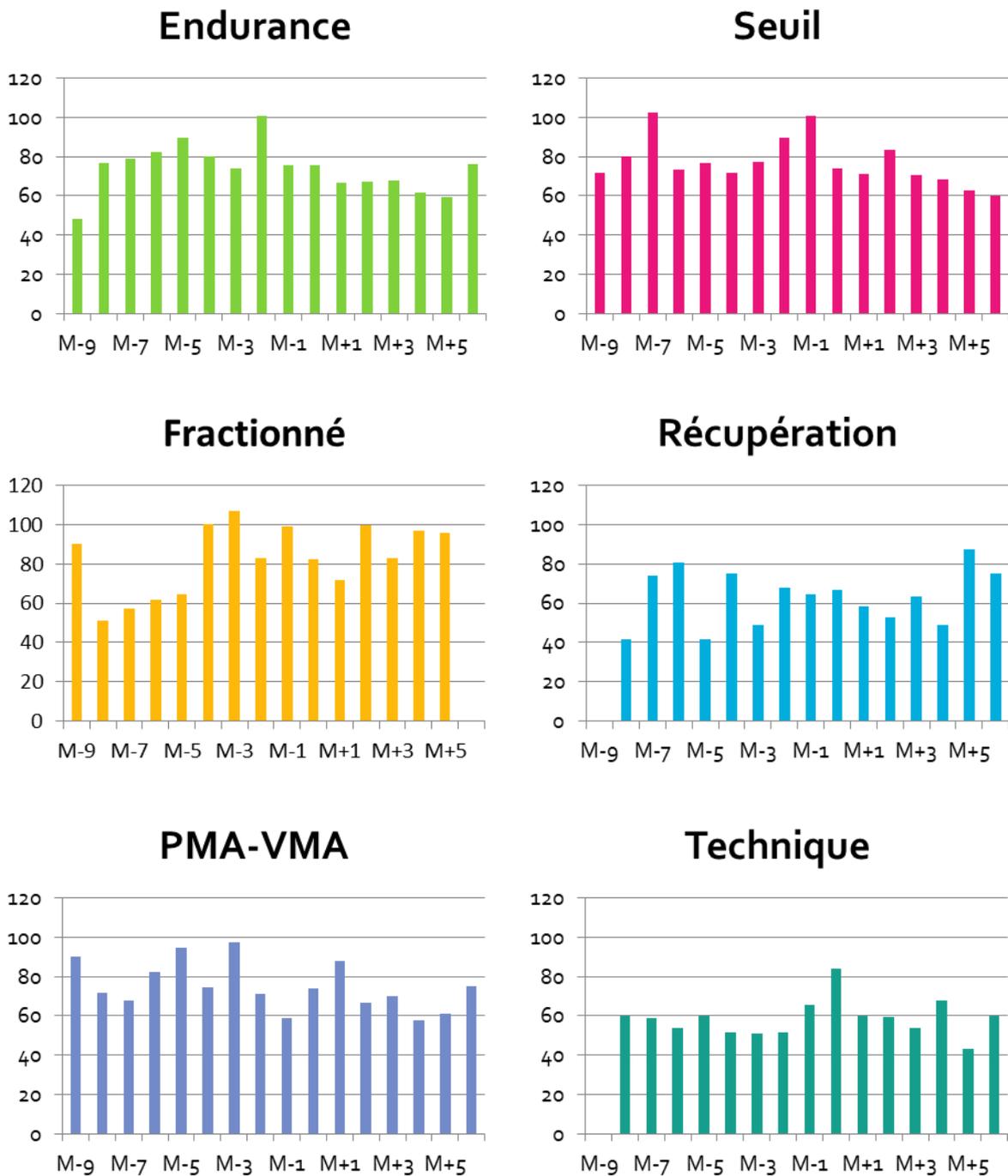
Enfin, les séances dites de technique sont presque l'exclusivité de la natation, même si les volumes horaires ne sont pas si importants tout au long de l'année, entre 30 et 120 minutes mensuelles en

général. On notera cependant un pic à M-1 au cours duquel 50 % du volume d'entraînement en technique se partage entre le vélo et la course à pied.

Nous terminons ce paragraphe par une analyse de l'évolution de la durée d'une séance d'entraînement en fonction du type de séance et de la discipline sportive, mais également en fonction du mois de suivi. Tout d'abord, la **figure 3-44** représente la durée moyenne en minutes en ordonnée, d'une séance d'entraînement en fonction du type de séance, quelle que soit la discipline, et du mois de suivi.

D'une façon générale, quel que soit le type de séance, la durée d'une séance ne dépasse pas généralement les 120 minutes en moyenne. Une séance d'endurance dure entre 60 et 80 minutes, avec un pic proche des 100 minutes à M-2. On est plus proche des 80 minutes sur la période M-6 – M-1 tandis qu'on avoisine plus nettement les 60 minutes sur la période M+1 – M+4. Il est en va de même avec les séances de seuil avec un pic à M-7 (environ 100 minutes) et un pic à M-2 – M-1 (autour de 90-100 minutes). La durée moyenne d'une séance de fractionné semble un peu plus fluctuante en fonction du mois de suivi. Il s'en dégage toutefois une tendance, avec une pratique moyenne par séance entre 60 et 80 minutes sur la période M-4 – M+6. Pour les séances de récupération, la durée moyenne est en général inférieure à 80 minutes et fluctue en fonction de la période. Pour les séances de PMA-VMA, il semblerait que les séances soient un peu plus longues sur la période M-6 – M-1, même si leur durée moyenne est assez variable. En période M+1 – M+4, cette durée est plutôt proche des 60 minutes. Enfin pour les séances de technique, la durée moyenne se situe entre 40 et 60 minutes, avec quelques pics ponctuels au-delà (maxi 80 minutes environ à M0).

Figure 3-44. Représentation de l'évolution de la durée moyenne en minutes d'une séance d'entraînement au cours de la période de suivi, en fonction du type de séance et indépendamment de la discipline pratiquée

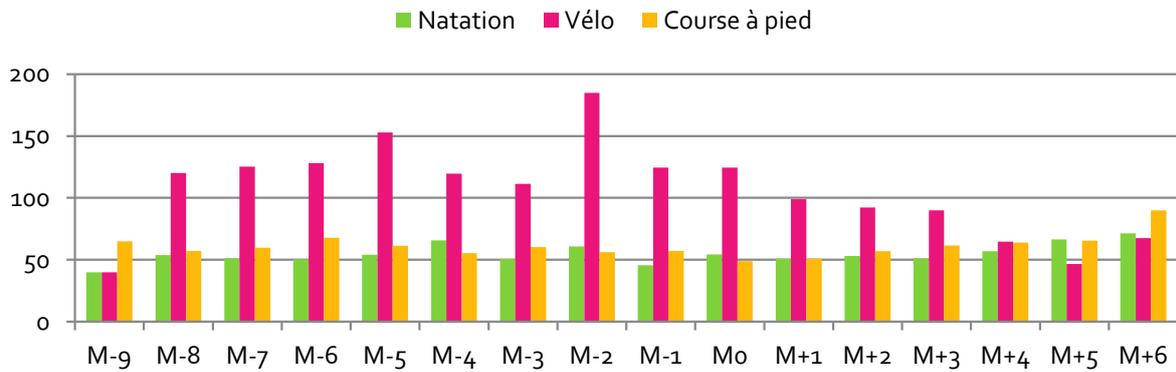


Nous poursuivons avec l'étude de la variation de la durée d'une séance en fonction du mois de suivi mais également en fonction de la discipline sportive et ce, pour chaque type d'entraînement, ce qui est représenté par la **figure 3-45**.

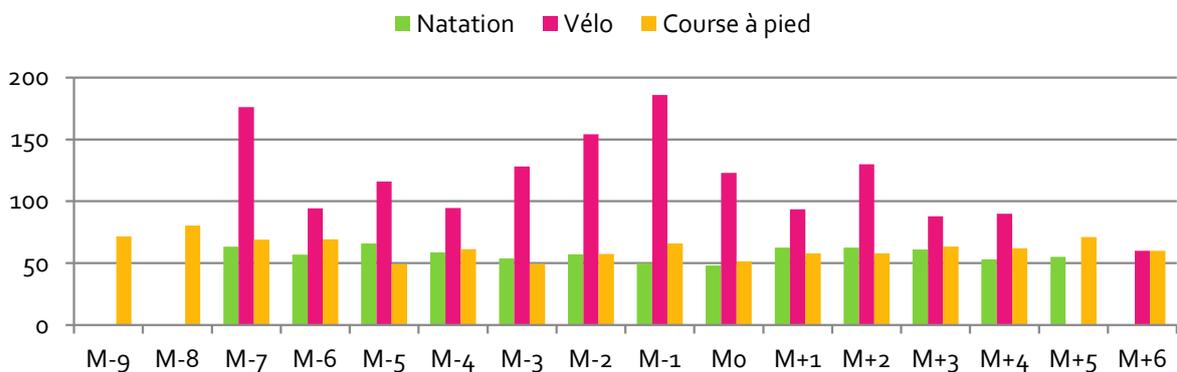
Figure 3-45. Représentation de l'évolution de la durée moyenne en minutes d'une séance d'entraînement au cours de la période de suivi, en fonction du type de séance et de la discipline pratiquée

L'axe des ordonnées représente la durée d'une séance en minutes tandis que l'axe des abscisses représente le mois de suivi sur la période d'étude.

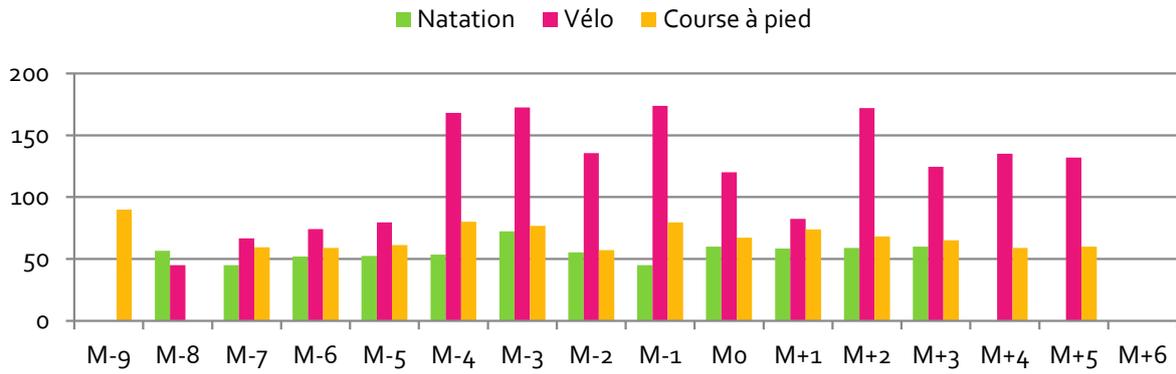
Endurance



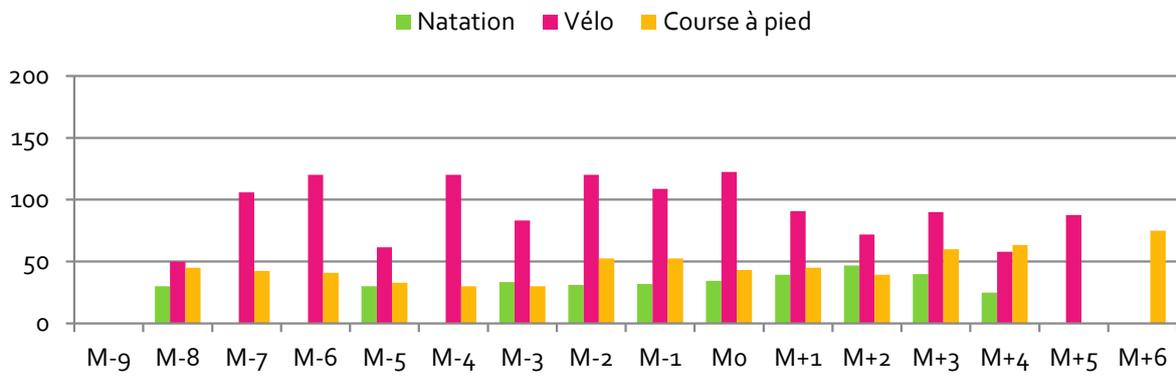
Seuil



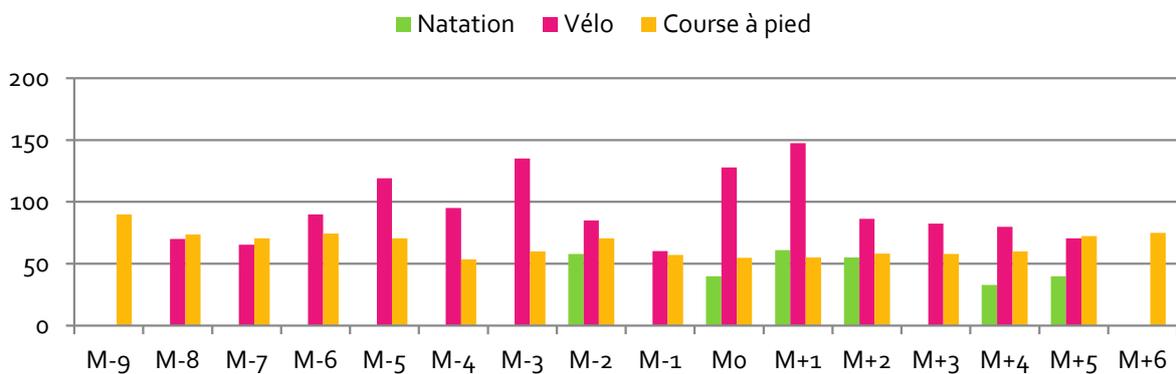
Fractionné



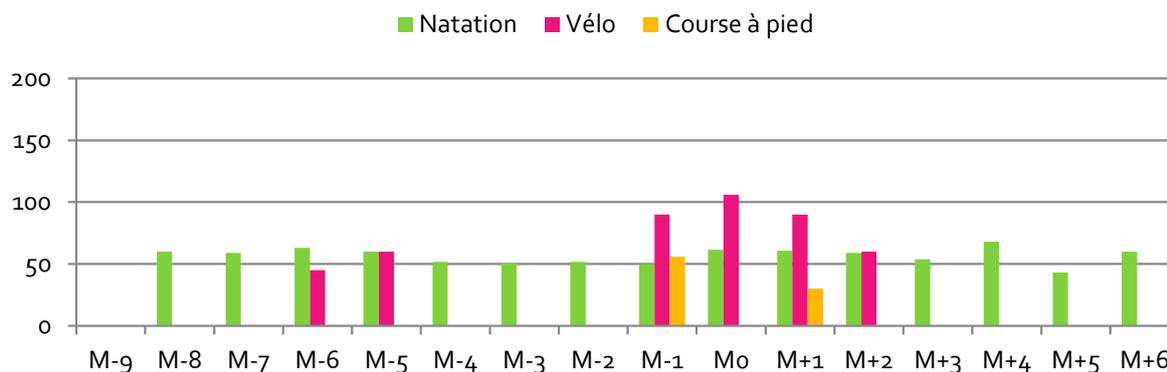
Récupération



PMA-VMA



Technique



D'une manière générale, et quel que soit le type de séance sauf pour la technique, la durée des séances de vélo est plus importante que celles de natation ou de course à pied et ce, pour le même type de séance. Bien entendu, ce constat est à modérer en fonction de la période de suivi également. On remarque que la durée des séances d'endurance réalisées en course à pied et en natation est à peu près la même tout au long de la période de suivi, soit 50 à 60 minutes environ. Ce qui n'est pas le cas en vélo, avec des séances de 100 à 200 minutes entre M-8 et M0. Cette tendance semble se retrouver pour les séances de seuil. Pour les séances de fractionné, cette majoration de la durée des séances réalisées en vélo est davantage observable sur la période M-4 – M+5. Pour les séances de PMA-VMA, même si les séances en vélo sont plus longues pour ce type d'entraînement, on constate que les séances de course à pied durent plus longtemps, quelle que soit la période. Enfin, les séances de technique ne semblent exister que pour la pratique de la natation avec une durée relativement stable de 50 minutes tout au long de la période de suivi.

C. Analyse de la charge d'entraînement et de son monitoring

Dans cette partie, nous allons aborder la charge d'entraînement de l'athlète, mais sous un aspect davantage quantitatif. Nous rappelons que la charge d'entraînement se compose de la charge externe et de la charge interne. La charge externe correspond à la charge générée par une séance donnée « sur le papier ». On pourrait d'ailleurs la représenter tel un cube en trois dimensions pour lequel les axes x, y, z s'apparenteraient à trois paramètres d'entraînement : la répétitivité des entraînements – comprendre le nombre de séances et le nombre de jours de repos, le volume horaire de la pratique sportive et l'intensité des séances. Enfin, la charge interne correspond à la manière dont le sportif « vit » sa séance, personnellement. Cet état peut en partie être appréhendé par le RPE, paramètre que nous avons également recueilli dans nos agendas. Les résultats que nous en avons tirés sont représentés sur les figures sous forme de moyennes (barres des histogrammes) et d'écart-types (trait plein noir ou gris), ou bien écrits sous la forme moyenne \pm écart-type.

1. Analyse de la charge d'entraînement

a. Analyse sur le nombre de séances et de jours de repos

La **figure 3-46** reprend l'évolution du nombre de séances hebdomadaires en fonction du mois de suivi. Ce nombre est assez fluctuant avec une première diminution à M-6 autour de 5,5 séances par semaine pour augmenter ensuite légèrement à M-3 à 6,5 et enfin diminuer jusqu'à M+4 à 4,5. On constate que la variabilité de ce paramètre est assez prononcée entre M-7 et M+4, avec un écart-type moyen de 2,40 sur cette période, contre 1,58 en dehors.

La **figure 3-47** s'intéresse quant à elle au nombre de jours de repos par semaine observés par les athlètes au cours de la période de suivi. On constate qu'ils respectent généralement au moins un jour de repos par semaine. Ce nombre augmente à deux jours de repos à M0 et oscille entre 2 et 3 sur la période M+1 – M+4. On remarque cependant que la variabilité de la mesure est majeure tout au long de la période suivant M-8, avec un écart-type compris entre 0,5 et 2,3.

Figure 3-46. Evolution du nombre de séances hebdomadaires observé par les triathlètes en fonction du mois de suivi

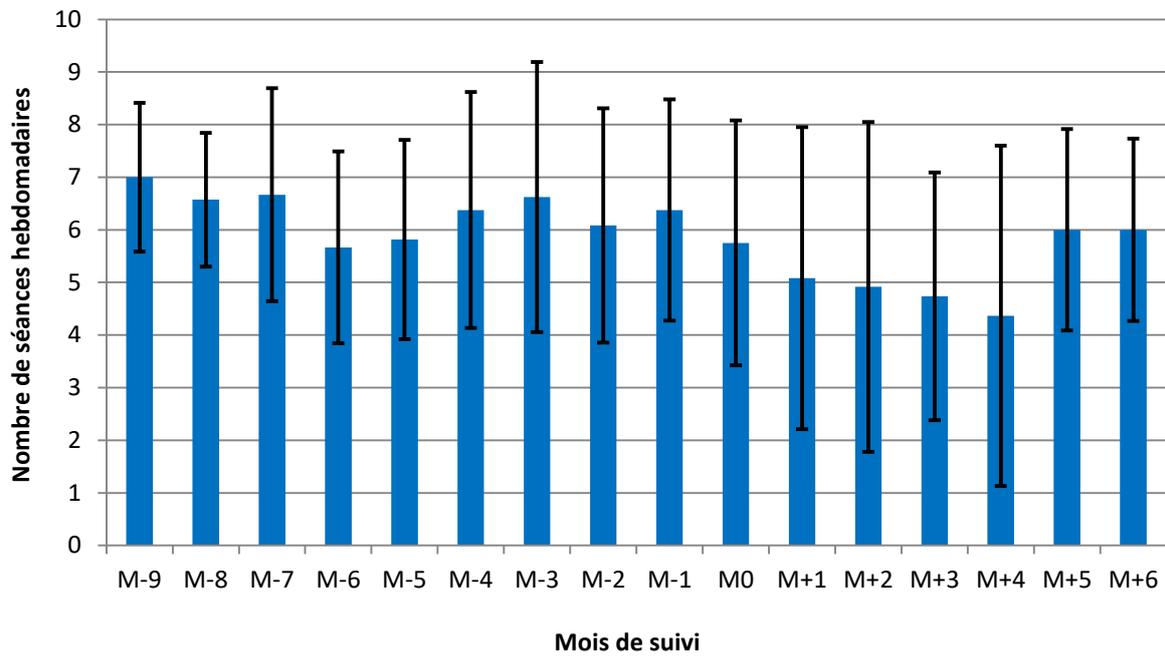
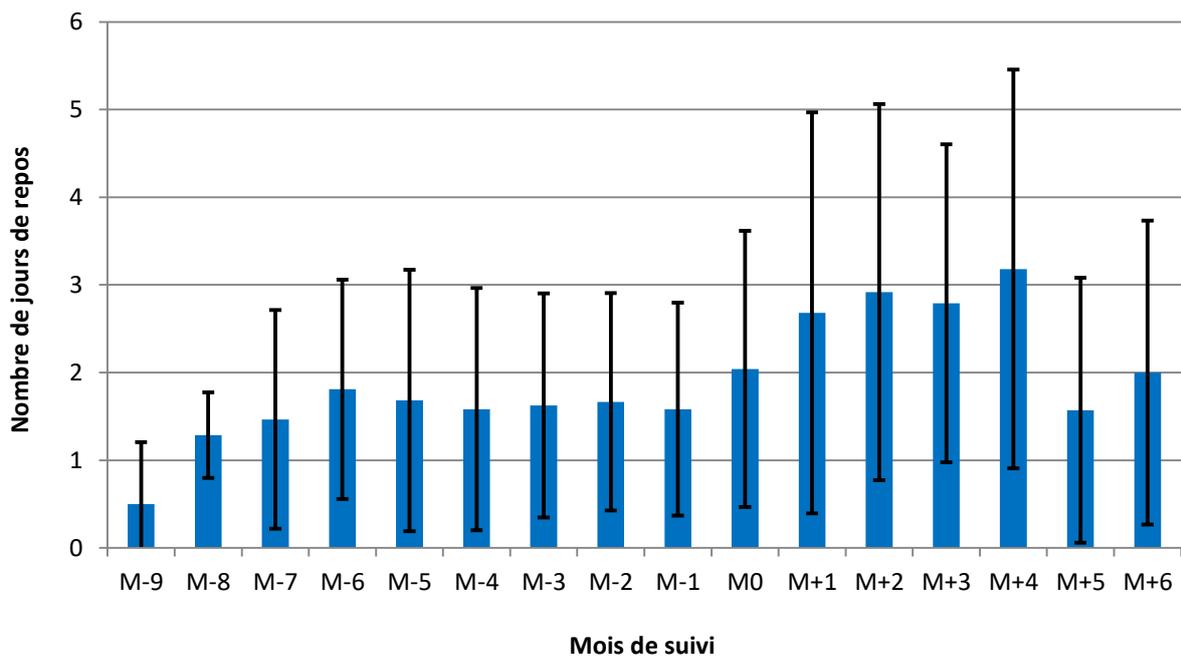
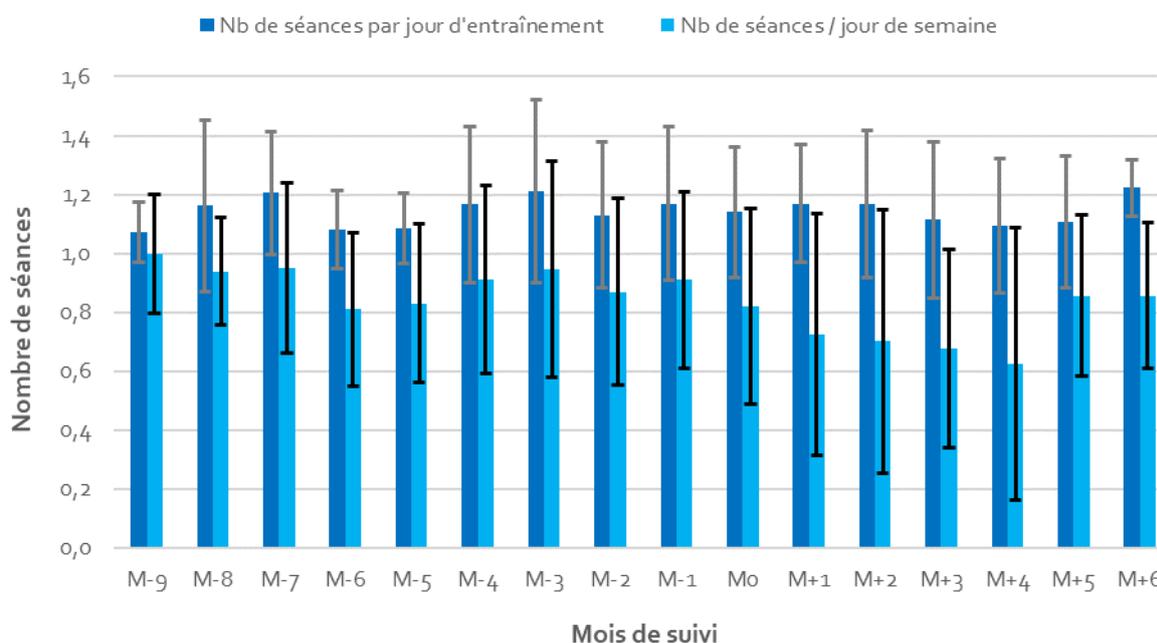


Figure 3-47. Evolution du nombre de jours de repos hebdomadaires observés par les athlètes en fonction du mois de suivi



La **figure 3-48** s'intéresse maintenant au nombre de séances quotidiennes en fonction du nombre de jours d'entraînement, donc en excluant les jours de repos ; mais également au nombre de séances quotidiennes rapporté aux sept jours de la semaine. On constate donc que, quel que soit le mois de suivi, un athlète réalise au moins une séance par jour d'entraînement et même un peu plus avec une moyenne de $1,15 \pm 0,23$ séance par jour d'entraînement sur l'ensemble de la période de suivi. D'une manière générale, on pourrait faire l'approximation qu'un athlète va réaliser un jour d'entraînement à deux séances tous les 10 jours d'entraînement, voire même tous les 5 jours d'entraînement pour M-7, M-3 et M+6 par exemple. La variabilité du paramètre est plus marquée pour deux mois, à savoir M-8 et M-3 avec un écart-type de respectivement 0,29 et 0,31.

Figure 3-48. Evolution du nombre de séances quotidiennes observé par les triathlètes en fonction du mois de suivi et ce, par jour d'entraînement et par jour de semaine (jour de repos y compris)

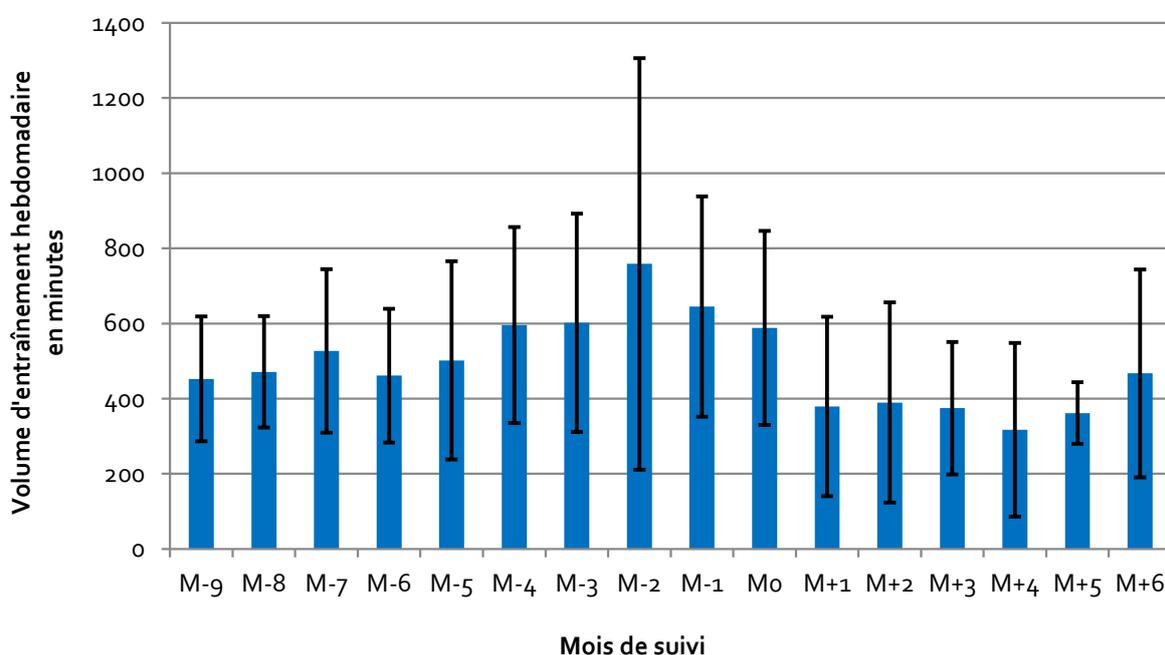


En termes de nombre de séances par jour de semaine, on constate que ce nombre diminue passant à une moyenne $0,83 \pm 0,34$ séance par jour de semaine, avec une variation dans le temps bien entendu similaire à celle observée sur la **figure 3-46**. Les variabilités du paramètre semblent d'ailleurs plus marquées d'une manière générale, comparativement à celles du paramètre « nombre de séances par jour d'entraînement ».

b. Analyse sur le volume horaire

Revenons maintenant à un paramètre que nous avons déjà étudié précédemment mais que nous allons présenter différemment, à savoir le volume horaire d'entraînement. La **figure 3-49** présente le volume horaire hebdomadaire moyen en minutes. On observe trois tendances : un volume d'entraînement moyen compris entre 400 et 600 minutes par semaine soit entre 6h40 et 10h00 sur la période M-9 – M-5 ; une augmentation du volume moyen entre M-4 et M0 pour passer la barre des 600 minutes et rester sous celle des 800 minutes soit entre 10h00 et 13h20 par semaine ; et enfin une diminution sous la barre des 400 minutes sans descendre sous 200 minutes d'entraînement par semaine soit entre 3h20 et 6h40 sur la période M+1 – M+5. La variabilité semble assez importante sur la période M-5 – M+2 avec des écarts-types supérieurs à 240 minutes ou quatre heures en général, et même un écart-type de 548 minutes ou 9h08 exactement pour M-2.

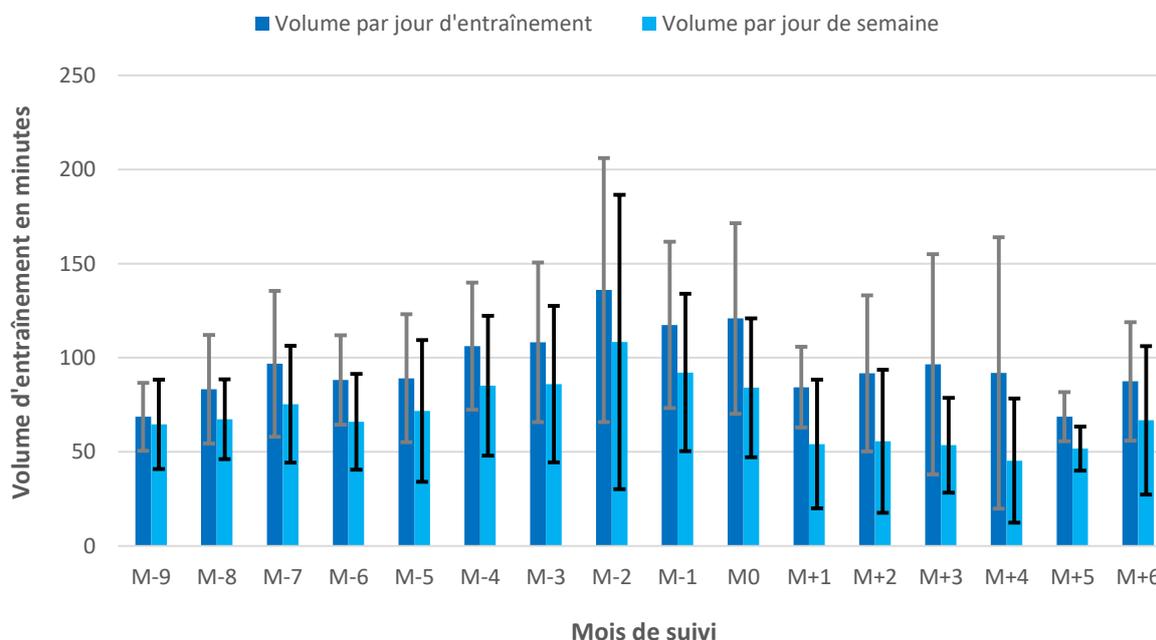
Figure 3-49. Evolution du volume d'entraînement hebdomadaire en minutes observé par les triathlètes en fonction du mois de suivi



Poursuivons avec l'étude de ce volume d'entraînement rapporté au nombre de jours d'entraînement mais également rapporté au nombre de jours de semaine donc jour de repos y compris (**figure 3-50**). Concernant le volume horaire par jour d'entraînement, celui-ci est compris entre 80 et 100 minutes sur la période M-8 – M-4. Il augmente ensuite pour être compris entre 100 et 120 minutes sur la période M-3 – M0 avec un écart-type moyen de 89 minutes, sauf à M-2 pour lequel le volume d'entraînement atteint la valeur moyenne de 136 minutes avec un écart-type de 108 minutes. Ensuite, ce volume repasse sous la barre des 100 minutes sur la période M+1 – M+6 avec un minimum à M+5 (69 ± 52 minutes).

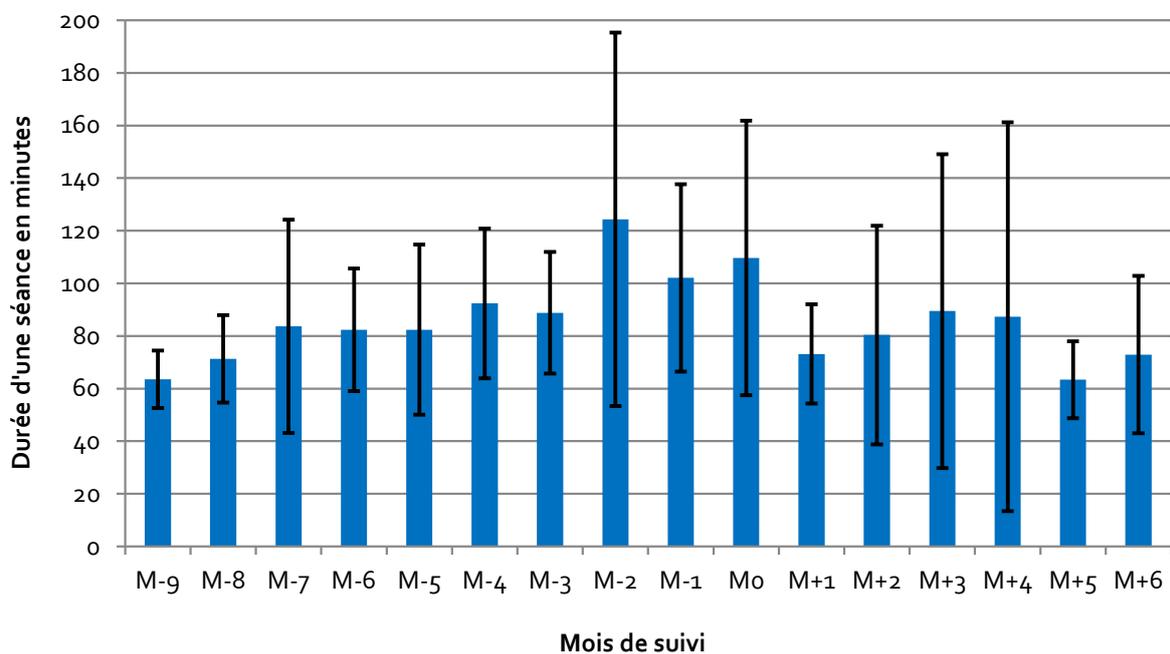
Si on observe maintenant ce volume d'entraînement hebdomadaire rapporté par jour de semaine donc repos y compris, on constate que ces tendances sont les mêmes en termes de période mais que tous les volumes seuils ont diminués de 20 minutes environ. Les variabilités du paramètre semblent d'ailleurs moins marquées pour la période post-objectif. Pour note, pour la période M+1 – M+5, le volume d'entraînement journalier moyen est inférieur à soixante minutes soit une heure (52 ± 28 minutes), et est même de 45 ± 33 minutes à M+4.

Figure 3-50. Evolution du volume d'entraînement quotidien en minutes observé par les triathlètes en fonction du mois de suivi et ce, par jour d'entraînement et par jour de semaine (jour de repos y compris)



Terminons par l'étude plus précise de la durée d'une séance à l'échelle d'une semaine et ce, par mois de suivi. La **figure 3-51** montre que d'une façon très générale, une séance d'entraînement dure plus de 60 minutes. Elle excède d'ailleurs les 100 minutes soit 1h40 sur la période M-2 – M0. On constate que ce paramètre peut être extrêmement variable, avec deux pics majeurs à M-2 et M+4 pour $\sigma = 71$ min et $\sigma = 74$ min respectivement.

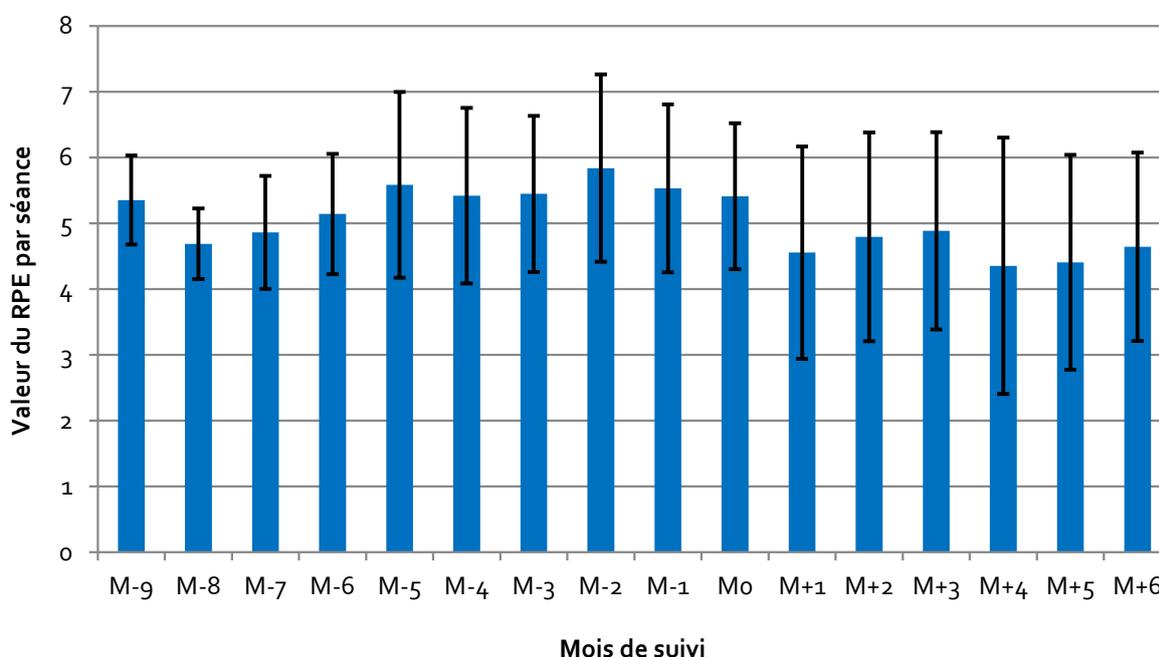
Figure 3-51. Evolution de la durée d'une séance en minutes observée par les triathlètes en fonction du mois de suivi



c. Analyse sur l'intensité de l'entraînement via le RPE

Continuons avec l'étude de la charge d'entraînement en termes d'intensité et donc de vécu de l'effort par le biais du RPE ou *Rating of Perceived Exertion*, ou encore indice d'effort perçu. La **figure 3-52** illustre l'évolution du RPE moyen par séance au cours de la période de suivi. On observe une fluctuation de cet indicateur entre 5 et 6 (sur 10 au maximum), entre M-6 et M0. Au-delà, celui-ci reste sous la barre de 5 jusqu'à M+6. La variabilité de la mesure passe la valeur de 1 d'écart-type dès M-5, avec des valeurs supérieures à 1,5 sur la période M+1 – M+5.

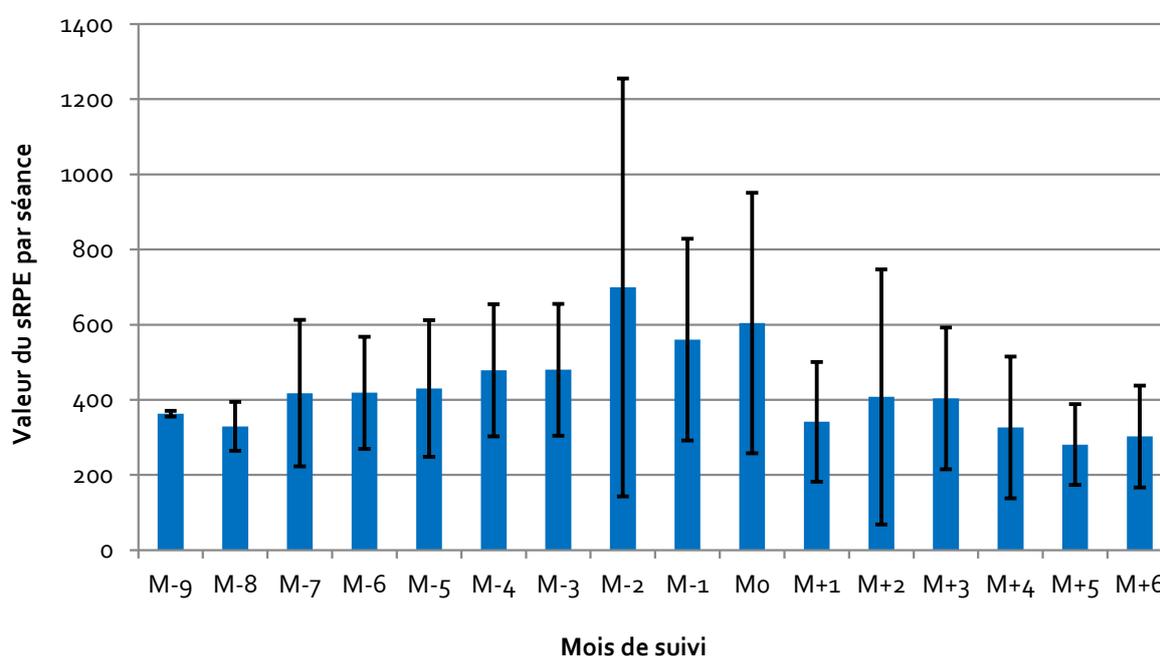
Figure 3-52. Evolution du RPE par séance, observé par les triathlètes en fonction du mois de suivi



Dans notre méthode de quantification et de suivi de la charge d'entraînement, nous utilisons les TRIMPS. Nous rappelons que cette méthode fait appel à l'étude du sRPE qui est le produit de la durée de l'effort en minutes par le RPE ressenti soit $sRPE = \text{durée} \times RPE$. La **figure 3-53** présente la variation du sRPE par séance sur la période de suivi tandis que la **figure 3-54** s'intéresse à l'évolution de la charge d'entraînement par jour d'entraînement mais également par jour de semaine, donc jour de repos y compris.

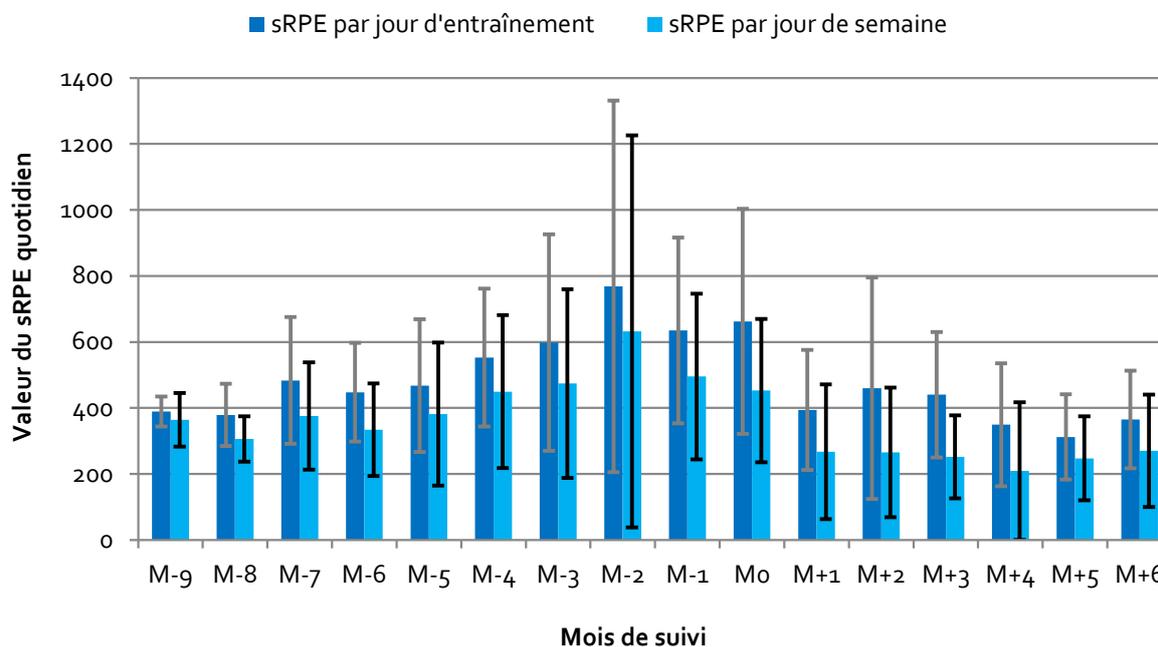
Concernant la **figure 3-53**, on observe une augmentation progressive du sRPE par séance de M-7 à M0, avec des valeurs comprises entre 400 et 600 et un pic majeur à M-2 à 699. Après M0, les valeurs repassent sous la barre des 400 et fluctuent jusqu'à M+6 sans jamais être inférieures à 250. Les écarts-types moyens sont compris entre 150 et 200 en règle générale, sauf sur la période M-2 – M0 pour lesquels ils s'élèvent respectivement à 556, 268 et 347 au cours de ces trois mois. Notons également un pic à M+2 avec $\sigma = 340$.

Figure 3-53. Evolution du sRPE par séance observé par les triathlètes en fonction du mois de suivi



Concernant la **figure 3-54**, on remarque que les valeurs du sRPE rapporté au jour d'entraînement montrent une nouvelle fois une augmentation progressive de M-6 à M-2 passant de 448 à 769, suivie d'une petite diminution sur M-1 – M0 (630-660). On observe ensuite un décrochage net à M+1 avec des fluctuations dans les mois qui vont suivre jusqu'à M+6, entre 300 et 460. Une fois de plus, la variabilité de ce paramètre est majeure pour les mois compris M-3 et M0, et M+2, pour lesquels les écarts-types fluctuent entre 280 et 565. Ces observations sont relativement applicables au sRPE rapporté au jour de semaine donc repos y compris, avec une diminution des valeurs de l'ordre de 15 à 20 %.

Figure 3-54. Evolution du sRPE observé par les triathlètes en fonction du mois de suivi et ce, par jour d'entraînement et par jour de semaine (jour de repos y compris)



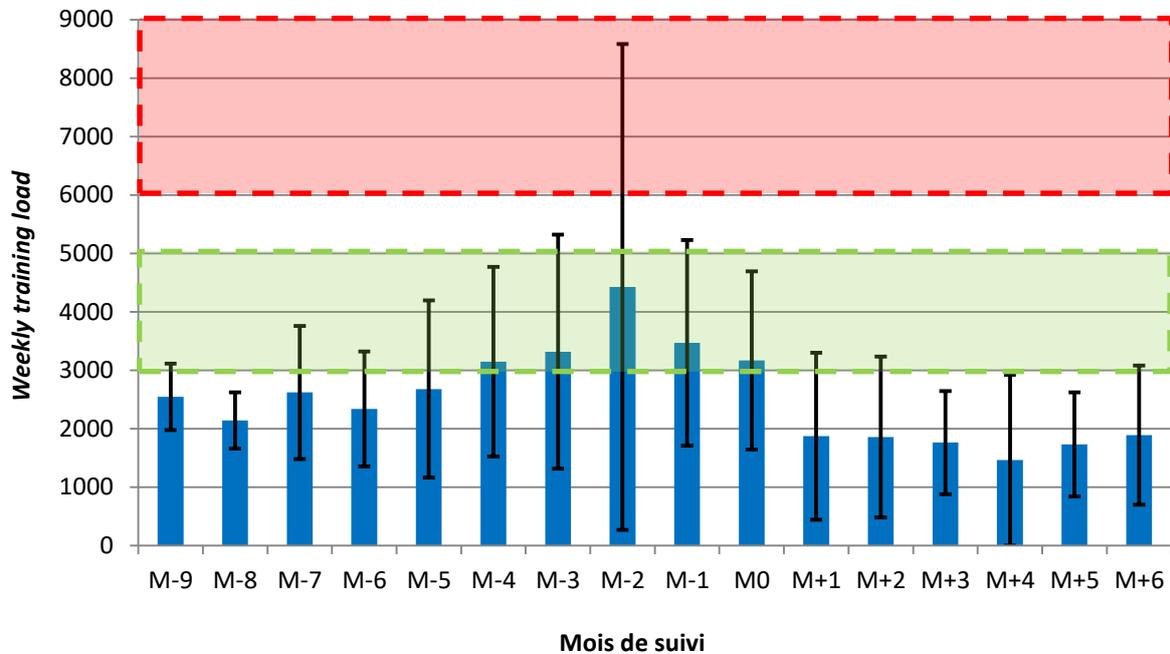
2. Monitoring de l'entraînement

Dans cette dernière partie destinée au monitoring et au suivi de la charge d'entraînement, nous allons présenter les données des critères d'évaluation composites à savoir le *weekly training load* (WTL), la *monotony*, le *strain* et le *fitness*.

Commençons par le *weekly training load* (**figure 3-55a**). On observe trois différentes périodes. La première va de M-9 à M-5 pour laquelle le *weekly training load* est compris entre 2000 et 3000. Ce paramètre augmente pour passer la barre des 3000, sans excéder celle des 3500 entre M-4 et M0, avec cependant un pic à M-2 à 4426. Enfin, la dernière période est comprise entre M+1 et M+6 avec des valeurs comprises entre 1000 et 2000, avec un minimum à M+4 de 1464. Une fois de plus, la variabilité de ce paramètre est assez marquée pour la période M-5 – M0 avec un écart-type supérieur à 1500, qui s'élève même à 4159 à M-2 soit quasi tout autant que la valeur de la moyenne.

Figure 3-55a. Evolution du *weekly training load* moyen observé chez les triathlètes en fonction du mois de suivi

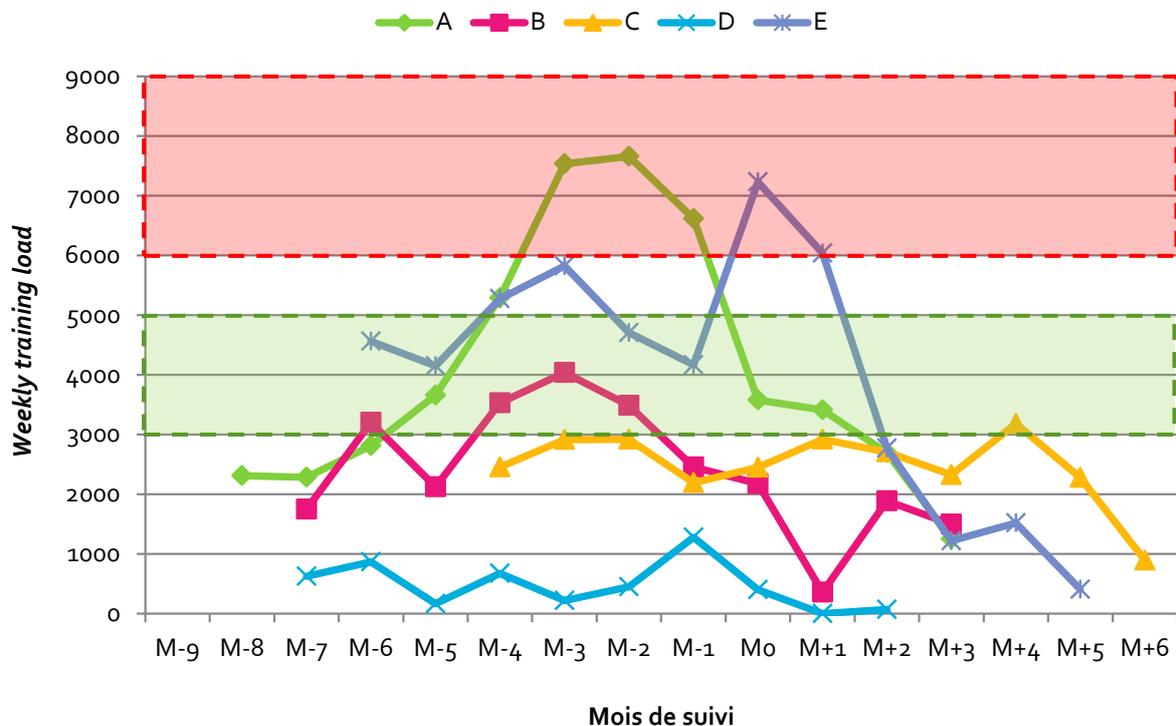
La zone d'entraînement optimal a été représentée en vert tandis que la zone à risque de surentraînement a été matérialisée en rouge.



Nous avons souhaité compléter nos résultats par la présentation de plusieurs profils de triathlètes pour illustrer les variations observées (**figure 3-55b**).

Figure 3-55b. Représentation de l'évolution du *weekly training load* au cours de la période de suivi pour plusieurs profils de triathlètes

La zone d'entraînement optimal a été représentée en vert tandis que la zone à risque de surentraînement a été matérialisée en rouge.

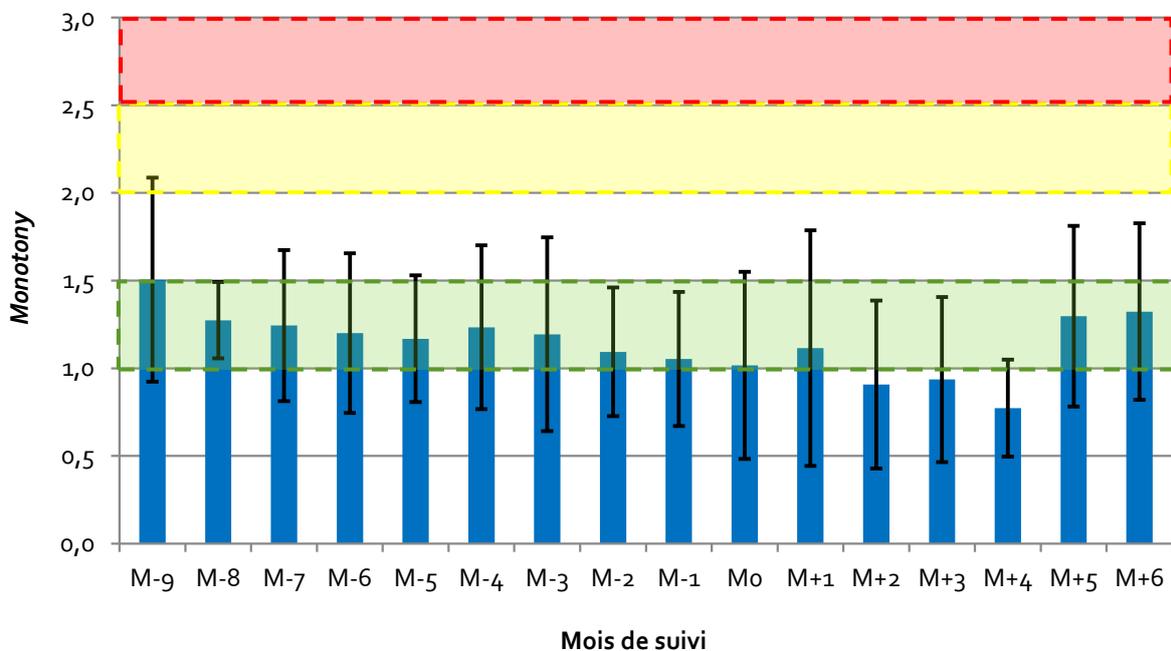


On observe que le triathlète A présente un *weekly training load* au-delà des 6000 unités sur la période M-3 – M-1 avant d'être à nouveau entre 3000 et 5000 à M-1 et M0. D'une façon quelque peu similaire, le triathlète E enregistre un WTL à plus de 7000 pour M0 et de façon isolée, alors qu'il se trouvait habituellement sous la barre des 6000 unités durant toute la période précédente. Le triathlète B quant à lui montre généralement un WTL compris entre 3000 et 5000 jusqu'à M-2 puis passe sous la barre des 3000 unités jusqu'à la fin de sa période de suivi. Enfin, les triathlètes C et D se trouvent toujours sous 3000 unités quel que soit le mois de suivi. Toutefois, le triathlète C montre un profil relativement stable tout au long de la période d'étude, avec un WTL toujours compris entre 2000 et 3000 unités (sauf à M+6).

Continuons avec la *monotony*. D'après la **figure 3-56a**, on observe une tendance à la diminution progressive de ce paramètre de M-9 à M+4, avec quelques rebonds ponctuels (M-4, M+1, M+3). On constate que les valeurs moyennes sont comprises entre 1 et 1,5 entre M-9 et M0. Toutefois, la variabilité de la monotonie semble assez fluctuante dans le temps, sans véritable tendance.

Figure 3-56a. Evolution de la *monotony* hebdomadaire moyenne observée chez les triathlètes en fonction du mois de suivi

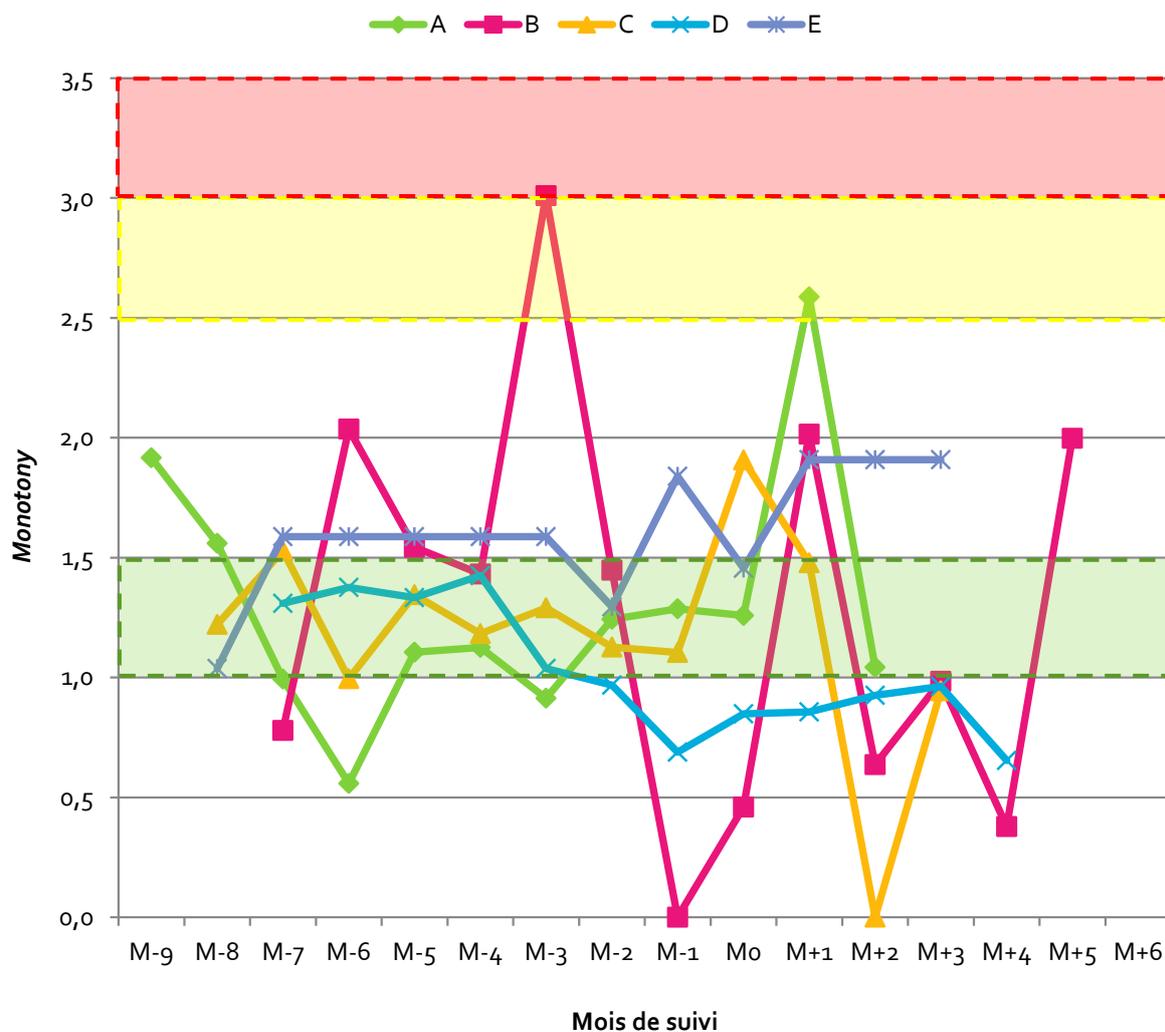
La zone d'entraînement optimal a été représentée en vert tandis que la zone à risque de surmenage ou de surentraînement a été matérialisée en jaune. La zone rouge indique la zone à risque de blessure majeure voire de pathologie au long cours.



La **figure 3-56b** présente les profils de plusieurs triathlètes en termes de suivi de la *monotony* sur la période de suivi.

Figure 3-56b. Représentation de l'évolution de la *monotony* au cours de la période de suivi pour plusieurs profils de triathlètes

La zone d'entraînement optimal a été représentée en vert tandis que la zone à risque de surmenage ou de surentraînement a été matérialisée en jaune. La zone rouge indique la zone à risque de blessure majeure voire de pathologie au long cours.

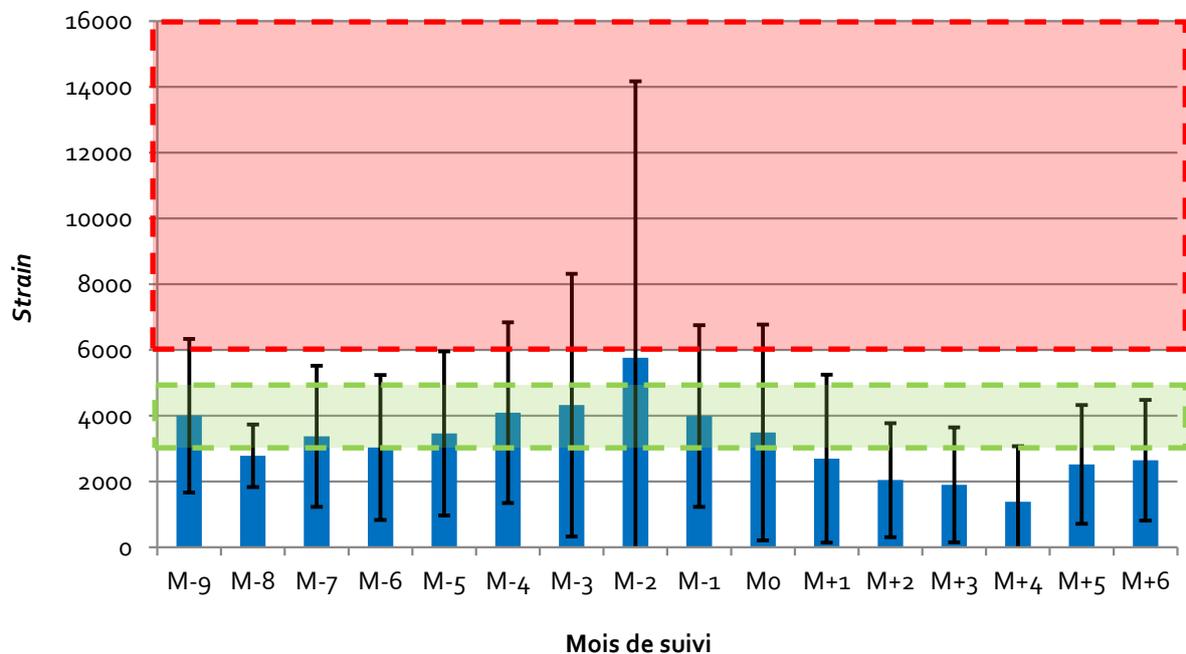


On voit que le triathlète A a une monotonie comprise entre 1 et 1,5 sur la période M-5 – M0 et à M+2. Le triathlète B montre un profil très variable avec seulement deux valeurs comprises entre 1 et 1,5 à M-4 et M-2, plusieurs valeurs aux alentours de 2, un pic à 3 à M-3 ainsi qu'une monotonie nulle à M-1. Le triathlète C est régulier avec la majorité des valeurs de monotonie comprises en zone verte (sauf à M0 avec une valeur à 1,91). Le triathlète D présente un profil en deux phases : une première phase de M-7 à M-3 avec des valeurs comprises entre 1 et 1,5 puis une seconde phase de M-2 à M+4 avec des valeurs en-dessous de 1. Enfin, le triathlète E présente un profil pour lequel il est quasiment toujours un peu au-dessus de la zone verte sauf pour M-8, M-2 et M0.

Poursuivons avec le *strain*. On observe grâce à la **figure 3-57a** que le *strain* augmente progressivement entre M-6 et M-2 (entre 3000 et 6000) puis diminue jusqu'à M+4, aux alentours de 1400. Une fois de plus, on note que la variabilité de ce paramètre est majeure autour de M-3 – M-2 avec un écart-type respectivement de 3994 et 8411, soit près de 1,5 fois la valeur moyenne à M-2.

Figure 3-57a. Evolution du *strain* hebdomadaire moyen observé chez les triathlètes en fonction du mois de suivi

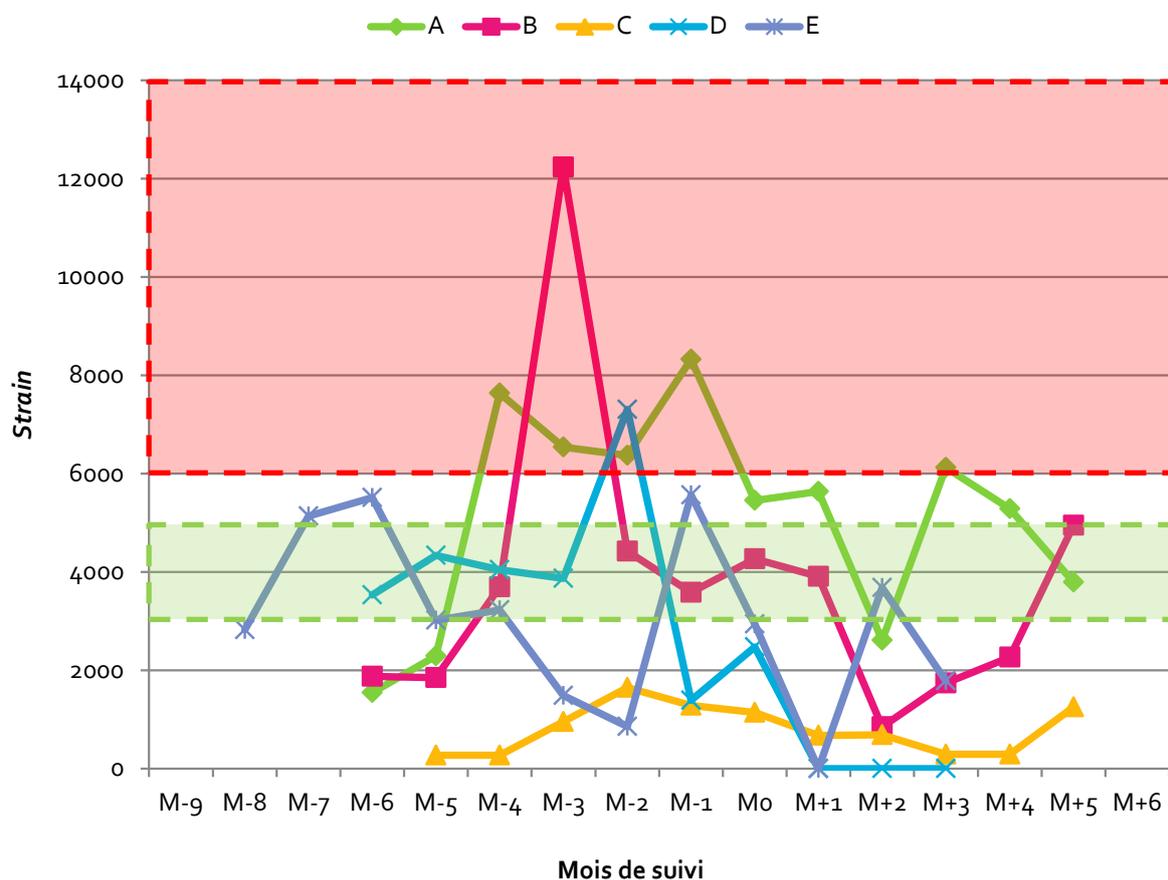
La zone d'entraînement optimal a été représentée en vert tandis que la zone à risque de surentraînement a été matérialisée en rouge.



La **figure 3-57b** présente les profils de plusieurs triathlètes en termes de suivi du *strain* sur la période de suivi.

Figure 3-57b. Représentation de l'évolution du *strain* au cours de la période de suivi pour plusieurs profils de triathlètes

La zone d'entraînement optimal a été représentée en vert tandis que la zone à risque de surentraînement a été matérialisée en rouge.

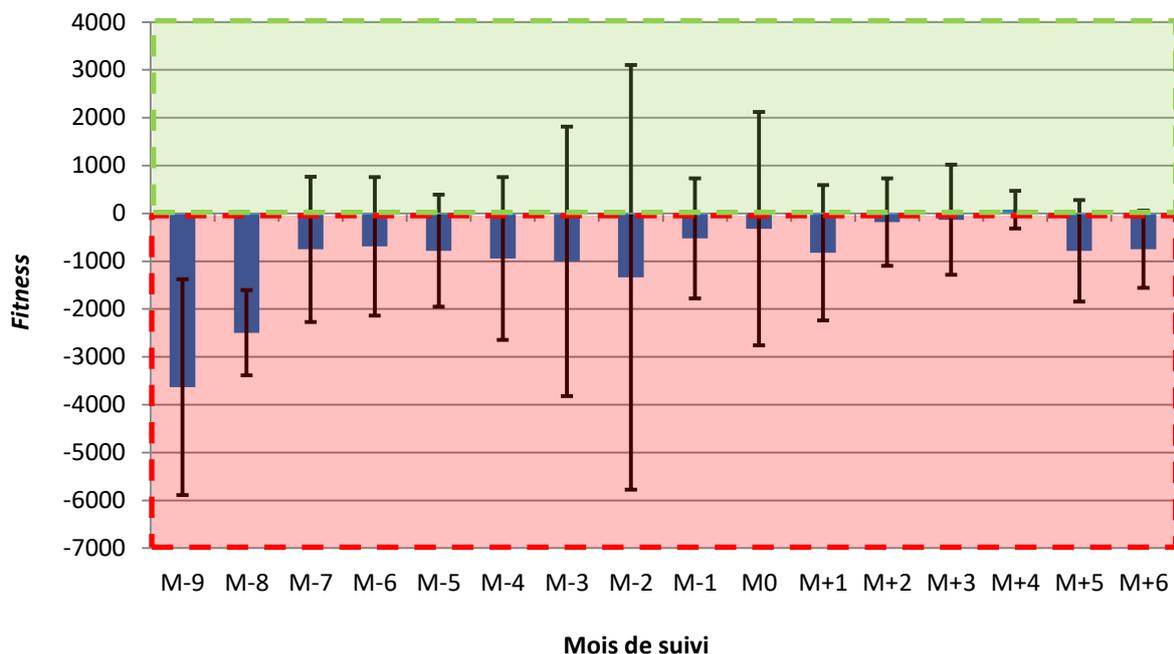


On constate que le triathlète A présente un *strain* inférieur à 3000 sur la période M-6 – M-5 puis ce paramètre va augmenter au-delà de 6000 de M-4 à M-1 pour diminuer ensuite et être compris entre 2500 et 6000 sur la période M0 – M+5 (avec un pic proche de 6000 à M+3). Pour le triathlète B, les valeurs de *strain* sont inférieures à 3000 sur deux périodes, M-6 – M-5 et M+2 – M+4. Ensuite, on observe une augmentation pour atteindre des valeurs relativement stables autour de 4000 sur la période M-4 – M+1, hormis un pic majeur à M-3 avec une valeur de 12 232 et un autre pic de moindre mesure à M+5 à 4943. Pour le triathlète C, l'ensemble des valeurs se situe sous la barre des 2000 unités. Le triathlète D quant à lui montre des valeurs de *strain* entre 3000 et 5000 de M-6 à M-3 puis un pic à 7300 à M-2. Ensuite, les valeurs diminuent en-dessous de 2500 sur M-1 et M0, puis deviennent nulles au-delà et ce, jusqu'à la fin de la période de suivi à M+4. Terminons avec le triathlète E qui affiche des valeurs assez fluctuantes tout au long de la période de suivi, dont trois mois entre 5000 et 6000 unités (M-7, M-6 et M-1) et un mois avec un score nul à M+2.

Terminons avec le *fitness* et la **figure 3-58a**. On remarque que ce paramètre est très diminué à M-9 et M-8 (respectivement -3636 et -2495) puis s'améliore nettement à M-7 – M-6 (-750 puis -700). Toutefois, il se dégrade à nouveau mais de manière moins marquée jusqu'à M-2 pour lequel il atteint la valeur de -1335. Ensuite, il s'améliore une nouvelle fois jusqu'à M0 sans devenir positif (-320). Pour cela, il faut se reporter à M+4 et sa valeur de 77, seule valeur positive de notre étude. Rappelons qu'il est important que le *fitness* soit positif à l'approche de l'objectif, d'où la nécessité d'étudier les écarts-types de nos moyennes mensuelles. Une fois encore, la variabilité de ce paramètre est majeure à l'approche de l'objectif, sur la période M-4 – M0 avec des valeurs comprises entre 1200 et 4500.

Figure 3-58a. Evolution du *fitness* hebdomadaire moyen observé chez les triathlètes en fonction du mois de suivi

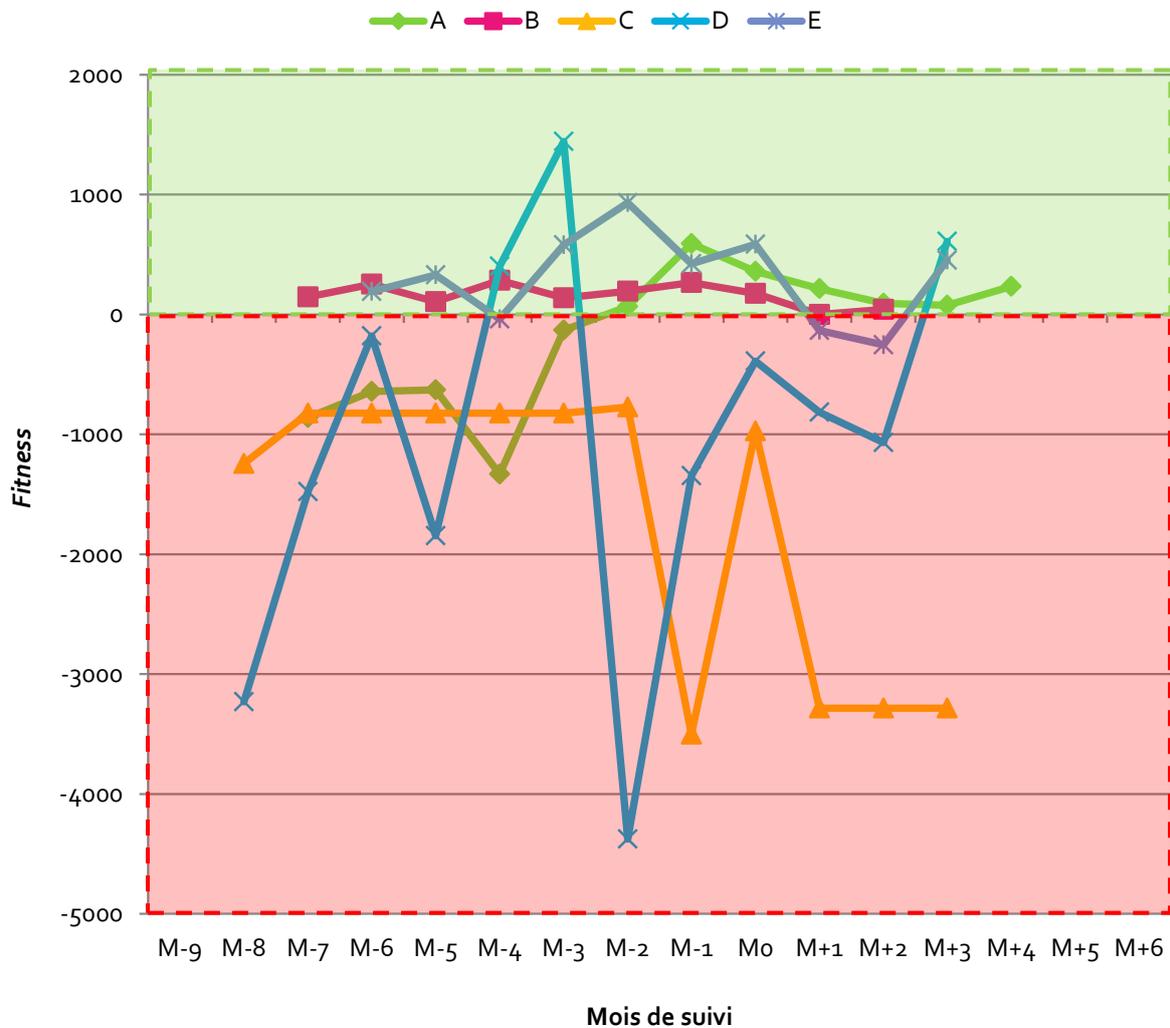
La zone de capacité de performance temporaire favorable est matérialisée en vert tandis que la zone de capacité de performance temporaire défavorable est représentée en rouge.



La **figure 3-58b** présente plusieurs profils de triathlètes et l'évolution de leur *fitness* au cours de la période de suivi.

Figure 3-58b. Représentation de l'évolution du *fitness* au cours de la période de suivi pour plusieurs profils de triathlètes

La zone de capacité de performance temporaire favorable est matérialisée en vert tandis que la zone de capacité de performance temporaire défavorable est représentée en rouge.



Le triathlète A a un fitness négatif sur la période M-7 – M-3 puis passe en positif sur le reste de la période de suivi, soit de M-2 à M+4. Le triathlète B reste en positif tout au long de sa période de suivi tandis que le triathlète C a un fitness exclusivement négatif avec deux décrochages majeurs : un à M-2 puis un en forme de plateau sur la période M+1 – M+3. Le triathlète D présente un fitness le plus souvent négatif avec deux pics positifs à M-3 et M+3 tandis que le triathlète E, lui, est le plus souvent dans le positif avec deux passages dans le négatif à M-4 et sur la période M+1 – M+2.

III. Paramètres issus des tonométries d'aplanation

Dans ce paragraphe, nous allons nous intéresser aux mesures issues de la tonométrie d'aplanation, à savoir les mesures de pression artérielle centrale mais également les mesures de vitesses de l'onde de pouls selon deux techniques, SphygmoCor® et PulsePen®. Nous rappelons dans le **tableau 3-13** le nombre d'exams dont nous disposons en fonction du groupe d'appartenance et du numéro de visite.

Tableau 3-13. Répartition du nombre d'exams de tonométrie étudiés, en fonction du groupe d'étude et du numéro de visite

	Groupe Triathlètes (Tri)	Groupe Contrôles (Ctrl)
Visite n°1	34	29
Visite n°2	33	28
Visite n°3	33	26

A. Mesures de pression artérielle et de fréquence cardiaque

1. Mesures périphériques

Les **tableaux 3-14** recensent les mesures des différentes pressions artérielles périphériques prises au niveau du bras gauche ainsi que des fréquences cardiaques, pendant le temps dédié à la tonométrie d'aplanation.

Le **tableau 3-14a** montre des différences significatives entre les triathlètes et les contrôles pour les pressions pulsées et les fréquences cardiaques, et ce, lors des trois visites. Les pressions pulsées sont plus élevées dans le groupe Tri (V1 : 59 ± 9 vs 52 ± 6 mmHg, $p < 0,001$; V2 : $54 (50 ; 60)$ vs $48 (45 ; 50)$ mmHg, $p < 0,001$; V3 : 55 ± 6 vs 51 ± 6 mmHg, $p = 0,005$), tandis que les fréquences cardiaques sont plus élevées dans le groupe Ctrl (V1 : 65 ± 9 vs 52 ± 7 bpm, $p < 0,001$; V2 : 61 ± 9 vs 52 ± 7 bpm, $p < 0,001$; V3 : 61 ± 9 vs 55 ± 8 bpm, $p = 0,009$). Les pressions artérielles systoliques sont plus élevées

dans le groupe Tri (V1 : 134 ± 10 vs 129 ± 9 mmHg, $p = 0,043$; V2 : 128 ± 10 vs 121 ± 7 mmHg, $p = 0,001$) mais que pour les deux premières visites (V1 et V2).

Tableau 3-14a. Comparaison entre les deux groupes d'étude des paramètres périphériques mesurés en prévision de la tonométrie d'aplanation, en fonction du numéro de visite

	Groupe Tri	Groupe Ctrl	<i>p</i> -value
Visite n°1			
PA systolique	134 ± 10	129 ± 9	0,043*
PA diastolique	75 ± 8	78 ± 7	0,149
PA moyenne	95 ± 8	95 ± 7	0,947
Pression pulsée	59 ± 9	52 ± 6	< 0,001*
FC	52 ± 7	65 ± 9	< 0,001*
Visite n°2			
PA systolique	128 ± 10	121 ± 7	0,001*
PA diastolique	72 ± 6	72 ± 6	0,933
PA moyenne	91 ± 6	89 ± 5	0,130
Pression pulsée	54 (50 ; 60)	48 (45 ; 50)	< 0,001*
FC	52 ± 7	61 ± 9	< 0,001*
Visite n°3			
PA systolique	131 ± 10	126 ± 10	0,055
PA diastolique	76 ± 7	75 ± 7	0,716
PA moyenne	95 ± 7	92 ± 7	0,287
Pression pulsée	55 ± 6	51 ± 6	0,005*
FC	55 ± 8	61 ± 9	0,009*
PA : pression artérielle, en mmHg ; FC : fréquence cardiaque, en bpm Les données sont exprimées sous la forme moyenne ± écart-type ou sous la forme médiane (IQR). Valeur significative si $p < 0,05$ et notée *			

Dans un second temps, nous proposons une comparaison longitudinale de ces mêmes paramètres et ce, dans chaque groupe d'étude (**tableau 3-14b**). Dans le groupe triathlètes, on constate qu'il n'y a pas de variation longitudinale significative de la pression pulsée ni de la fréquence cardiaque. Toutefois, il existe une variation significative de la pression artérielle systolique ($p = 0,033$) ainsi que de la pression artérielle moyenne ($p = 0,043$) sur la période d'étude. Or d'après le **tableau 3-14c**, cette variation significative – que ce soit pour la pression artérielle systolique ou pour la pression artérielle moyenne – a lieu entre V1 et V2 (respectivement : 134 ± 10 vs 128 ± 10 mmHg, $p < 0,001$;

95 ± 8 vs 91 ± 6 mmHg, $p < 0,001$) puis entre V2 et V3 (respectivement : 128 ± 10 vs 131 ± 10 vs mmHg, $p = 0,018$; 91 ± 6 vs 95 ± 7 mmHg, $p = 0,011$), sans toutefois que les valeurs enregistrées à V1 et à V3 ne diffèrent significativement (respectivement, $p = 0,191$ et $p = 0,387$).

Pour le groupe contrôles, d'après le **tableau 3-14b**, on constate qu'il n'y a pas de variation longitudinale significative de la pression pulsée ni de la fréquence cardiaque. Toutefois, il existe une variation significative de la pression artérielle systolique ($p = 0,002$), de la pression artérielle diastolique ($p = 0,009$) ainsi que de la pression artérielle moyenne ($p = 0,002$) sur la période d'étude. Or d'après le **tableau 3-14c**, cette variation significative – que ce soit pour la pression artérielle systolique, pour la pression artérielle diastolique ou pour la pression artérielle moyenne – a lieu entre V1 et V2 (PA systolique : 129 ± 9 vs 121 ± 7 mmHg, $p < 0,001$; PA diastolique : 78 ± 7 vs 72 ± 6 mmHg, $p = 0,015$; PA moyenne : 95 ± 7 vs 89 ± 5 mmHg, $p < 0,001$) puis entre V2 et V3 (respectivement, 121 ± 7 vs 126 ± 10 mmHg, $p = 0,018$; 72 ± 6 vs 75 ± 7 mmHg, $p = 0,015$; 89 ± 5 vs 92 ± 7 mmHg, $p = 0,011$), sans toutefois que les valeurs enregistrées à V1 et à V3 ne diffèrent significativement (respectivement, $p = 0,191$, $p = 0,746$ et $p = 0,387$).

Tableau 3-14b. Comparaison longitudinale pour chaque groupe d'étude, des paramètres périphériques mesurés en prévision de la tonométrie d'aplanation

	Visite n°1	Visite n°2	Visite n°3	p-value
Groupe Triathlètes				
PA systolique	134 ± 10	128 ± 10	131 ± 10	0,033*
PA diastolique	75 ± 8	72 ± 6	76 ± 7	0,078
PA moyenne	95 ± 8	91 ± 6	95 ± 7	0,043*
Pression pulsée	59 ± 9	56 ± 9	55 ± 6	0,091
FC	52 ± 7	52 ± 7	55 ± 8	0,172
Groupe Contrôles				
PA systolique	129 ± 9	121 ± 7	126 ± 10	0,002*
PA diastolique	78 ± 7	72 ± 6	75 ± 7	0,009*
PA moyenne	95 ± 7	89 ± 5	92 ± 7	0,002*
Pression pulsée	52 ± 6	49 ± 6	51 ± 6	0,141
FC	65 ± 9	61 ± 9	61 ± 9	0,177
PA : pression artérielle, en mmHg ; FC : fréquence cardiaque, en bpm Les données sont exprimées sous la forme moyenne ± écart-type ou sous la forme médiane (IQR). Valeur significative si $p < 0,05$ et notée *				

Tableau 3-14c. Comparaison deux à deux des paramètres périphériques mesurés en prévision de la tonométrie d'aplanation, dont l'évolution longitudinale s'est avérée précédemment significative

	V1 – V2 <i>p</i> -value	V2 – V3 <i>p</i> -value	V1 – V3 <i>p</i> -value
Groupe Triathlètes			
PA systolique	< 0,001*	0,018*	0,191
PA moyenne	< 0,001*	0,011*	0,387
Groupe Contrôles			
PA systolique	< 0,001*	0,018*	0,191
PA diastolique	0,015*	0,015*	0,746
PA moyenne	< 0,001*	0,011*	0,387
PA : pression artérielle, en mmHg Valeur significative si $p < 0,05$ et notée *			

2. Mesures centrales

Les mesures de pression artérielle centrale ont été obtenues grâce à l'utilisation du tonomètre d'aplanation SphygmoCor® et sont résumées dans les **tableaux 3-15**, dans lesquels figurent également les résultats des différentes comparaisons de ces paramètres centraux.

Le **tableau 3-15a** montre que la fréquence cardiaque est plus basse chez les triathlètes (V1 : 51 ± 6 vs 63 ± 10 bpm, $p < 0,001$; V2 : 50 ± 6 vs 60 ± 9 bpm, $p < 0,001$; V3 : $52 (50 ; 57)$ vs $58 (56 ; 67)$ bpm, $p = 0,018$). La pression pulsée est significativement plus élevée dans le groupe Tri et ce, pour V1 ($37 (34 ; 40)$ vs $33 (31 ; 37)$ mmHg, $p = 0,037$) et V2 (36 ± 5 vs 32 ± 6 mmHg, $p = 0,012$). Enfin, la pression artérielle systolique est significativement plus basse dans le groupe Ctrl et que pour V2 (107 ± 9 vs 111 ± 8 mmHg, $p = 0,031$).

Tableau 3-15a. Comparaison entre les deux groupes d'étude des paramètres centraux mesurés avec le tonomètre d'aplanation SphygmoCor®, en fonction du numéro de visite

	Groupe Tri	Groupe Ctrl	p-value
Visite n°1	117 ± 9	113 ± 9	0,181
PA systolique	80 ± 7	79 ± 7	0,753
PA diastolique	92 (86 ; 97)	91 (87 ; 94)	0,900
PA moyenne	37 (34 ; 40)	33 (31 ; 37)	0,037*
Pression Pulsée	51 ± 6	63 ± 10	<0,001*
FC			
Visite n°2	111 ± 8	107 ± 9	0,031*
PA systolique	76 ± 7	74 ± 6	0,405
PA diastolique	87 ± 7	87 ± 7	0,719
PA moyenne	36 ± 5	32 ± 6	0,012*
Pression Pulsée	50 ± 6	60 ± 9	<0,001*
FC			
Visite n°3	112 ± 9	112 ± 10	0,893
PA systolique	77 ± 7	78 ± 7	0,808
PA diastolique	89 ± 7	91 ± 8	0,549
PA moyenne	35 ± 5	34 ± 6	0,481
Pression Pulsée	52 (50 ; 57)	58 (56 ; 67)	0,018*
FC			
PA : pression artérielle, en mmHg ; FC : fréquence cardiaque, en bpm Les données sont exprimées sous la forme moyenne ± écart-type ou sous la forme médiane (IQR). Valeur significative si $p < 0,05$ et notée *			

Dans un second temps, nous proposons une comparaison longitudinale de ces mêmes paramètres et ce, dans chaque groupe d'étude (**tableau 3-15b**). Dans le groupe triathlètes, on constate qu'il y a une variation longitudinale significative de la pression artérielle systolique ($p = 0,037$) et de la pression artérielle moyenne ($p = 0,035$) uniquement. Or d'après le **tableau 3-15c**, cette variation significative – que ce soit pour la pression artérielle systolique ou pour la pression artérielle moyenne – a lieu uniquement entre V1 et V2 (respectivement : 117 ± 9 vs 111 ± 8 mmHg, $p = 0,006$; 92 ± 8 vs 87 ± 7 mmHg, $p = 0,006$). Pour le groupe contrôles, d'après le **tableau 3-15b**, on constate qu'il n'y a pas de variation longitudinale significative de la pression pulsée ni de la fréquence cardiaque. Toutefois, il existe une variation significative de la pression artérielle systolique ($p = 0,023$), de la pression artérielle diastolique ($p = 0,030$) ainsi que de la pression artérielle moyenne ($p = 0,026$) sur la période

d'étude. Or d'après le **tableau 3-15c**, cette variation significative – que ce soit pour la pression artérielle systolique, pour la pression artérielle diastolique ou pour la pression artérielle moyenne – a lieu uniquement entre V1 et V2 (respectivement : 113 ± 9 vs 107 ± 9 mmHg, $p = 0,006$; 79 ± 7 vs 74 ± 6 mmHg, $p = 0,018$; 93 ± 9 vs 87 ± 7 mmHg, $p = 0,006$).

Tableau 3-15b. Comparaison longitudinale pour chaque groupe d'étude, des paramètres centraux mesurés avec le tonomètre d'aplanation SphygmoCor®

	Visite n°1	Visite n°2	Visite n°3	p-value
Groupe Triathlètes				
PA systolique	117 ± 9	111 ± 8	112 ± 9	0,037*
PA diastolique	80 ± 7	76 ± 7	77 ± 7	0,072
PA moyenne	92 ± 8	87 ± 7	89 ± 7	0,035*
Pression Pulsée	37 ± 6	36 ± 5	35 ± 5	0,363
FC	51 (47 ; 54)	50 (47 ; 54)	52 (50 ; 57)	0,149
Groupe Contrôles				
PA systolique	113 ± 9	107 ± 9	112 ± 10	0,023*
PA diastolique	79 ± 7	74 ± 6	78 ± 7	0,030*
PA moyenne	93 ± 9	87 ± 7	91 ± 8	0,026*
Pression Pulsée	33 (31 ; 37)	31 (29 ; 35)	33 (30 ; 39)	0,200
FC	63 ± 10	60 ± 9	60 ± 10	0,524
PA : pression artérielle, en mmHg ; FC : fréquence cardiaque, en bpm Les données sont exprimées sous la forme moyenne \pm écart-type ou sous la forme médiane (IQR). Valeur significative si $p < 0,05$ et notée *				

Tableau 3-15c. Comparaison deux à deux des paramètres centraux mesurés avec le tonomètre d'aplanation SphygmoCor®, dont l'évolution longitudinale s'est avérée précédemment significative

	V1 – V2 <i>p</i>-value	V2 – V3 <i>p</i>-value	V1 – V3 <i>p</i>-value
Groupe Triathlètes			
PA systolique	0,006*	0,135	0,135
PA moyenne	0,006*	0,083	0,212
Groupe Contrôles			
PA systolique	0,006*	0,135	0,135
PA diastolique	0,018*	0,132	0,244
PA moyenne	0,006*	0,083	0,212
PA : pression artérielle, en mmHg Valeur significative si $p < 0,05$ et notée *			

B. Mesures de la vitesse de l'onde de pouls

Dans ce paragraphe, nous nous intéressons aux mesures de la vitesse de l'onde de pouls, mesurée en tonométrie d'aplanation. Pour cela, nous avons utilisé deux tonomètres différents, à savoir le SphygmoCor® et le PulsePen®. Les différents résultats sont présentés dans les **tableaux 3-16**.

D'après le **tableau 3-16a**, on observe l'absence de différence significative entre les deux groupes d'étude sur les mesures de la VOP à V1. Lors de la seconde visite, il existe une différence significative chez les triathlètes pour qui les valeurs sont plus basses ($5,7 \pm 0,6$ vs $6,3 \pm 0,8$ m/s, $p < 0,001$) pour le SphygmoCor® uniquement, bien que la p -value du PulsePen® pour cette même visite soit très proche de 0,05 ($p = 0,055$). Enfin, les valeurs de la VOP sont significativement plus basses dans le groupe Tri et pour les deux tonomètres pour la visite n°3 (SphygmoCor® : $5,9 \pm 0,8$ vs $6,5 \pm 0,7$ m/s, $p = 0,007$; PulsePen® : $5,6 (5,1 ; 6,2)$ vs $6,9 (6,1 ; 8,4)$ m/s, $p < 0,001$).

Tableau 3-16a. Comparaison entre les deux groupes d'étude des vitesses de l'onde de pouls mesurées avec les tonomètres d'aplanation SphygmoCor® et PulsePen®, en fonction du numéro de visite

	Groupe Tri	Groupe Ctrl	p-value
Visite n°1			
SphygmoCor®	6,4 ± 0,7	6,5 ± 0,8	0,576
PulsePen®	6,2 (5,7 ; 6,7)	6,8 (6,1 ; 7,5)	0,089
Visite n°2			
SphygmoCor®	5,7 ± 0,6	6,3 ± 0,8	< 0,001*
PulsePen®	5,8 ± 1,1	6,4 ± 1,1	0,055
Visite n°3			
SphygmoCor®	5,9 ± 0,8	6,5 ± 0,7	0,007*
PulsePen®	5,6 (5,1 ; 6,2)	6,9 (6,1 ; 8,4)	< 0,001*
Les valeurs indiquées correspondent à des mesures de vitesse de l'onde de pouls en m/s. Les données sont exprimées sous la forme moyenne ± écart-type ou sous la forme médiane (IQR). Valeur significative si $p < 0,05$ et notée *			

Dans un second temps, nous proposons une comparaison longitudinale de ces mêmes paramètres et ce, dans chaque groupe d'étude (**tableau 3-16b**). Dans le groupe triathlètes, on constate qu'il y a une variation longitudinale significative de la vitesse de l'onde de pouls mesurée par SphygmoCor® ($p < 0,001$) et par PulsePen® ($p = 0,041$). Or d'après le **tableau 3-16c**, cette variation significative pour les mesures avec le SphygmoCor® a lieu uniquement entre V1 et V2 ($6,4 \pm 0,7$ vs $5,7 \pm 0,6$ m/s, $p = 0,003$). Quant aux mesures réalisées avec le PulsePen®, malgré une variation significative sur l'ensemble de la période de suivi, il n'a pas été possible d'objectiver à quel moment cette variation significative intervenait.

Tableau 3-16b. Comparaison longitudinale pour chaque groupe d'étude, des vitesses de l'onde de pouls mesurées avec les tonomètres d'aplanation SphygmoCor® et PulsePen®

	Visite n°1	Visite n°2	Visite n°3	p-value
Groupe Triathlètes				
SphygmoCor®	6,4 ± 0,7	5,7 ± 0,6	5,9 ± 0,8	< 0,001*
PulsePen®	6,2 (5,7 ; 6,7)	5,7 (5,3 ; 6,8)	5,6 (5,1 ; 6,2)	
Groupe Contrôles				
SphygmoCor®	6,5 ± 0,8	6,3 ± 0,8	6,5 ± 0,7	0,649
PulsePen®	6,8 (6,1 ; 7,5)	6,5 (5,8 ; 6,9)	6,9 (6,1 ; 8,4)	0,114

Les valeurs indiquées correspondent à des mesures de vitesse de l'onde de pouls en m/s.
 Les données sont exprimées sous la forme moyenne ± écart-type ou sous la forme médiane (IQR). Valeur significative si $p < 0,05$ et notée *

Tableau 3-16c. Comparaison deux à deux des vitesses de l'onde de pouls mesurées avec les tonomètres d'aplanation SphygmoCor® et PulsePen®, dont l'évolution longitudinale s'est avérée précédemment significative

	V1 – V2 p-value	V2 – V3 p-value	V1 – V3 p-value
Groupe Triathlètes			
SphygmoCor®	0,003*	0,137	0,092
PulsePen®	0,372	0,584	0,372

Les valeurs indiquées correspondent à des mesures de vitesse de l'onde de pouls en m/s.
 Les données sont exprimées sous la forme moyenne ± écart-type ou sous la forme médiane (IQR). Valeur significative si $p < 0,05$ et notée *

IV. Paramètres issus de l'examen IRM

Dans ce paragraphe, nous allons aborder les différentes mesures réalisées au cours du temps dédié à l'examen IRM. Nous rappelons dans le **tableau 3-17** le nombre d'examens dont nous disposons en fonction du groupe d'appartenance et du numéro de visite.

Tableau 3-17. Répartition du nombre d'IRM étudiées en fonction du groupe d'étude et du numéro de visite

	Groupe Triathlètes (Tri)	Groupe Contrôles (Ctrl)
Visite n°1	34	29
Visite n°2	33	28
Visite n°3	33	26

A. Mesure périphérique et comparaison des mesures de pression artérielle

1. Mesures périphériques

Les **tableaux 3-18** recensent les valeurs des pressions artérielles et de la fréquence cardiaque mesurées pendant l'examen IRM.

D'après le **tableau 3-18a**, on constate que seule la fréquence cardiaque montre une différence significative entre les triathlètes et les contrôles pour les trois visites, avec des valeurs plus basses chez les triathlètes (à V1 : 57 ± 10 vs 66 ± 9 bpm, $p < 0,001$; V2 : 51 ± 8 vs 64 ± 9 bpm, $p < 0,001$; V3 : 56 ± 9 vs 66 ± 8 bpm, $p < 0,001$). On note toutefois que la pression pulsée est significativement plus élevée dans le groupe triathlètes pour V2 (44 ± 5 vs 41 ± 4 mmHg, $p = 0,012$) et V3 (42 ± 5 vs 40 ± 4 mmHg, $p = 0,019$).

Tableau 3-18a. Comparaison entre les deux groupes d'étude des pressions artérielles périphériques et de la fréquence cardiaque mesurées dans l'IRM, en fonction du numéro de visite

	Groupe Tri (n = 34)	Groupe Ctrl (n = 29)	p-value
Visite n°1			
PA systolique	112 ± 8	113 ± 8	0,583
PA diastolique	69 ± 6	71 ± 6	0,182
PA moyenne	83 ± 7	85 ± 7	0,280
Pression Pulsée	43 ± 5	42 ± 5	0,365
FC	57 ± 10	66 ± 9	<0,001*
Visite n°2			
PA systolique	112 ± 7	108 ± 7	0,053
PA diastolique	68 ± 6	68 ± 6	0,694
PA moyenne	83 ± 6	81 ± 6	0,303
Pression Pulsée	44 ± 5	41 ± 4	0,012*
FC	51 ± 8	64 ± 9	<0,001*
Visite n°3			
PA systolique	108 ± 8	107 ± 7	0,576
PA diastolique	66 ± 7	68 ± 6	0,294
PA moyenne	80 ± 7	81 ± 6	0,602
Pression Pulsée	42 ± 5	40 ± 4	0,019*
FC	56 ± 9	66 ± 8	<0,001*
PA : pression artérielle, en mmHg ; FC : fréquence cardiaque, en bpm Les données sont exprimées sous la forme moyenne ± écart-type. Valeur significative si $p < 0,05$ et notée *			

Dans un second temps, nous proposons une comparaison longitudinale de ces mêmes paramètres et ce, dans chaque groupe d'étude (**tableau 3-18b**). Ce tableau nous apprend qu'il existe une variabilité significative de la fréquence cardiaque chez les triathlètes au cours de la période de suivi ($p = 0,024$). Or, d'après le **tableau 3-18c**, il n'a pas été possible d'objectiver à quel moment entre deux visites, cette variation significative intervenait. Pour nos contrôles et d'après le **tableau 3-18b**, il existe une variabilité significative des pressions artérielles systolique ($p = 0,013$), diastolique ($p = 0,044$) et moyenne ($p = 0,022$) au cours de la période de suivi. Or d'après le **tableau 3-18c**, cette variation significative apparaît entre V1 et V3 pour la pression artérielle moyenne uniquement ($p = 0,033$).

Tableau 3-18b. Comparaison longitudinale pour chaque groupe d'étude, des pressions artérielles périphériques et de la fréquence cardiaque mesurées dans l'IRM

	Visite n°1	Visite n°2	Visite n°3	p-value
Groupe Triathlètes				
PA systolique	112 ± 8	112 ± 7	108 ± 8	0,111
PA diastolique	69 ± 6	68 ± 6	66 ± 7	0,124
PA moyenne	83 ± 7	83 ± 6	80 ± 7	0,095
Pression Pulsée	43 ± 5	44 ± 5	42 ± 5	0,621
FC	55 (50 ; 64)	50 (47 ; 55)	56 (50 ; 60)	0,024*
Groupe Contrôles				
PA systolique	113 ± 8	108 ± 7	107 ± 7	0,013*
PA diastolique	71 ± 6	68 ± 6	68 ± 6	0,044*
PA moyenne	85 ± 7	81 ± 6	81 ± 6	0,022*
Pression Pulsée	42 ± 5	41 ± 4	40 ± 4	0,217
FC	66 ± 9	64 ± 9	66 ± 8	0,624

PA : pression artérielle, en mmHg ; FC : fréquence cardiaque, en bpm
 Les données sont exprimées sous la forme moyenne ± écart-type ou sous la forme médiane (IQR). Valeur significative si $p < 0,05$ et notée *

Tableau 3-18c. Comparaison deux à deux des pressions artérielles périphériques et de la fréquence cardiaque mesurées dans l'IRM, dont l'évolution longitudinale s'est avérée précédemment significative

	V1 – V2 p-value	V2 – V3 p-value	V1 – V3 p-value
Groupe Triathlètes			
FC	0,219	0,219	0,846
Groupe Contrôles			
PA systolique	0,209	0,209	0,066
PA diastolique	0,165	0,342	0,057
PA moyenne	0,175	0,175	0,033*

PA : pression artérielle, en mmHg ; FC : fréquence cardiaque, en bpm
 Valeur significative si $p < 0,05$ et notée *

2. Comparaison des mesures de pression artérielle

Dans ce paragraphe, nous avons souhaité comparer les différentes valeurs de pression artérielle – centrale et périphérique – afin de mettre en évidence certains écarts significatifs qui pourraient avoir un impact sur l’interprétation de certains paramètres composites.

Lorsque l’on compare les mesures de pression artérielle brachiale réalisées dans l’IRM et les mesures brachiales faites au moment de la tonométrie, on constate qu’il existe une différence significative entre les différentes mesures (**tableau 3-19a**). En effet, toutes les mesures de pression artérielle brachiale sont significativement plus élevées lors de l’examen de tonométrie (PA systolique : 110 ± 8 vs 129 ± 10 mmHg, $p < 0,001$; PA diastolique : $68 (64 ; 73)$ vs $75 (69 ; 79)$ mmHg, $p < 0,001$; PA moyenne : 82 ± 7 vs 93 ± 7 mmHg, $p < 0,001$; PA pulsée : $42 (38 ; 45)$ vs $54 (49 ; 58)$ mmHg, $p < 0,001$).

Tableau 3-19a. Comparaison de l’ensemble des mesures de pression artérielle brachiale réalisées dans l’IRM et au moment de la tonométrie

	PA brachiales IRM	PA brachiales Tonométrie	<i>p</i> -value
PA systolique	110 ± 8	129 ± 10	< 0,001*
PA diastolique	$68 (64 ; 73)$	$75 (69 ; 79)$	< 0,001*
PA moyenne	82 ± 7	93 ± 7	< 0,001*
PA pulsée	$42 (38 ; 45)$	$54 (49 ; 58)$	< 0,001*
PA : pression artérielle, en mmHg Les données sont exprimées sous la forme moyenne \pm écart-type ou sous la forme médiane (IQR). Valeur significative si $p < 0,05$ et notée *			

Lorsque l’on compare les mesures de pression artérielle brachiale réalisées dans l’IRM et les mesures de pression artérielle centrale, on constate qu’il existe une différence significative entre les différentes mesures (**tableau 3-19b**). Les mesures de pression artérielle périphériques systolique, diastolique et moyenne, réalisées dans l’IRM, sont significativement plus basses que les mesures de pression artérielle centrale (PA systolique : 110 ± 8 vs 112 ± 9 mmHg, $p < 0,001$; PA diastolique : 68 ± 6 vs 77 ± 7 mmHg, $p < 0,001$; PA moyenne : $82 (77 ; 86)$ vs $90 (84 ; 95)$ mmHg, $p < 0,001$). La pression artérielle pulsée est quant à elle significativement plus élevée lorsqu’elle est issue de mesures périphériques dans l’IRM ($42 (38 ; 45)$ vs $35 (31 ; 39)$ mmHg, $p < 0,001$).

Tableau 3-19b. Comparaison de l'ensemble des mesures de pression artérielle brachiale réalisées dans l'IRM et de l'ensemble des pressions artérielles centrales mesurées par le tonomètre d'aplanation SphygmoCor®

	PA brachiales IRM	PA centrales SphygmoCor®	<i>p</i> -value
PA systolique	110 ± 8	112 ± 9	< 0,001*
PA diastolique	68 ± 6	77 ± 7	< 0,001*
PA moyenne	82 (77 ; 86)	90 (84 ; 95)	< 0,001*
PA pulsée	42 (38 ; 45)	35 (31 ; 39)	< 0,001*
PA : pression artérielle, en mmHg Les données sont exprimées sous la forme moyenne ± écart-type ou sous la forme médiane (IQR). Valeur significative si <i>p</i> < 0,05 et notée *			

Lorsque l'on compare les mesures de pression artérielle brachiale réalisées au moment de la tonométrie et les mesures de pression artérielle centrale, on constate qu'il existe une différence significative entre les différentes mesures (**tableau 3-19c**). Les mesures de pression artérielle périphériques systolique, moyenne et pulsée, réalisées au moment de la tonométrie, sont significativement plus élevées que les mesures de pression artérielle centrale (PA systolique : 129 ± 10 vs 112 ± 9 mmHg, *p* < 0,001 ; PA moyenne : 93 (87 ; 97) vs 90 (84 ; 95) mmHg, *p* < 0,001 ; pression pulsée : 54 (49 ; 58) vs 35 (31 ; 39) mmHg, *p* < 0,001). La pression artérielle diastolique est quant à elle significativement plus basse lorsqu'elle est issue de mesures périphériques au moment de la tonométrie (PA diastolique : 75 (69 ; 79) vs 77 (72 ; 82) mmHg, *p* < 0,001).

Tableau 3-19c. Comparaison de l'ensemble des mesures de pression artérielle brachiale au moment de la tonométrie et l'ensemble des pressions artérielles centrales mesurées par le tonomètre d'aplanation SphygmoCor®

	PA brachiales tonométrie	PA centrales SphygmoCor®	<i>p</i> -value
PA systolique	129 ± 10	112 ± 9	< 0,001*
PA diastolique	75 (69 ; 79)	77 (72 ; 82)	< 0,001*
PA moyenne	93 (87 ; 97)	90 (84 ; 95)	< 0,001*
PA pulsée	54 (49 ; 58)	35 (31 ; 39)	< 0,001*
PA : pression artérielle, en mmHg Les données sont exprimées sous la forme moyenne ± écart-type ou sous la forme médiane (IQR). Valeur significative si <i>p</i> < 0,05 et notée *			

B. Paramètres ventriculaires

Les parties B.1 et B.2 ont fait l'objet d'un Stage d'Initiation à la Recherche d'Emeline LUC, interne en imagerie médicale au CHRU de Nancy.

1. Cœur gauche

Dans ce paragraphe, nous allons aborder les différentes mesures intéressant le cœur gauche et plus particulièrement le ventricule gauche. Les résultats sont résumés dans les **tableaux 3-20**.

D'après le **tableau 3-20a**, nous pouvons constater que le volume télésystolique indexé du VG est significativement plus élevé dans le groupe triathlètes que dans le groupe contrôles et ce, pour les trois visites (V1 : 44 ± 8 vs 38 ± 7 mL/m², $p < 0,001$; V2 : 46 ± 8 vs 36 ± 6 mL/m², $p < 0,001$; V3 : 43 ± 9 vs 35 ± 6 mL/m², $p < 0,001$). Ces observations sont superposables pour le volume télédiastolique indexé (V1 : 105 ± 13 vs 93 ± 14 mL/m², $p < 0,001$; V2 : 106 ± 11 vs 90 ± 12 mL/m², $p < 0,001$; V3 : 100 ± 15 vs 90 ± 13 mL/m², $p = 0,010$). Le volume d'éjection systolique indexé est quant à lui significativement augmenté dans le groupe Tri pour V2 uniquement (60 ± 6 vs 55 ± 7 mL/m², $p = 0,002$). Enfin, la FEVG est significativement plus basse chez les triathlètes pour V2 (57 ± 4 vs 60 ± 3 %, $p < 0,001$) et V3 (57 ± 5 vs 60 ± 3 %, $p = 0,002$), tandis que la masse indexée du VG est significativement plus élevée dans ce même groupe (V1 : 64 (60 ; 69) vs 29 (27 ; 32) g/m², $p < 0,001$; V2 : 66 (62 ; 69) vs 27 (26 ; 30) g/m², $p < 0,001$; V3 : 62 (58 ; 68) vs 29 (26 ; 30) g/m², $p < 0,001$).

Tableau 3-20a. Comparaison entre les deux groupes d'étude des mesures intéressant le ventricule gauche, en fonction du numéro de visite

	Groupe Tri	Groupe Ctrl	p-value
Visite n°1			
VTS indexé	44 ± 8	38 ± 7	< 0,001*
VTD indexé	105 ± 13	93 ± 14	< 0,001*
VES indexé	60 ± 7	56 ± 8	0,076
FEVG	58 ± 5	60 ± 3	0,052
Masse indexée	64 (60 ; 69)	29 (27 ; 32)	< 0,001*
Visite n°2			
VTS indexé	46 ± 8	36 ± 6	< 0,001*
VTD indexé	106 ± 11	90 ± 12	< 0,001*
VES indexé	60 ± 6	55 ± 7	0,002*
FEVG	57 ± 4	60 ± 3	< 0,001*
Masse indexée	66 (62 ; 69)	27 (26 ; 30)	< 0,001*
Visite n°3			
VTS indexé	43 ± 9	35 ± 6	< 0,001*
VTD indexé	100 ± 15	90 ± 13	0,010*
VES indexé	57 ± 8	54 ± 8	0,210
FEVG	57 ± 5	60 ± 3	0,002*
Masse indexée	62 (58 ; 68)	29 (26 ; 30)	< 0,001*
VTS indexé : volume télésystolique indexé, en mL/m ² ; VTD indexé : volume télédiastolique indexé, en mL/m ² ; VES indexé : volume d'éjection systolique indexé, en mL/m ² ; FEVG : fraction d'éjection du ventricule gauche, en % ; masse indexée, en g/m ² Les données sont exprimées sous la forme moyenne ± écart-type ou sous la forme médiane (IQR). Valeur significative si p < 0,05 et notée *			

Dans un second temps, nous proposons une comparaison longitudinale de ces mêmes paramètres et ce, dans chaque groupe d'étude (**tableau 3-20b**) : il n'y a pas de variation significative des mesures intéressant le ventricule gauche au cours de notre période de suivi, que ce soit dans le groupe Tri ou dans le groupe Ctrl.

Tableau 3-20b. Comparaison longitudinale pour chaque groupe d'étude, des mesures intéressant le ventricule gauche

	Visite n°1	Visite n°2	Visite n°3	p-value
Groupe Triathlètes				
VTS indexé	44 ± 8	46 ± 8	43 ± 9	0,382
VTD indexé	105 ± 13	106 ± 11	100 ± 15	0,101
VES indexé	60 ± 7	60 ± 6	57 ± 8	0,096
FEVG	58 (55 ; 60)	56 (54 ; 60)	56 (54 ; 61)	0,815
Masse indexée	65 ± 8	66 ± 7	63 ± 8	0,249
Groupe Contrôles				
VTS indexé	37 ± 7	36 ± 6	35 ± 6	0,393
VTD indexé	93 ± 14	90 ± 12	90 ± 13	0,574
VES indexé	56 ± 8	55 ± 7	54 ± 8	0,598
FEVG	60 (59 ; 62)	60 (59 ; 62)	60 (58 ; 63)	0,932
Masse indexée	29 ± 4	28 ± 4	28 ± 3	0,474
VTS indexé : volume télésystolique indexé, en mL/m ² ; VTD indexé : volume télédiastolique indexé, en mL/m ² ; VES indexé : volume d'éjection systolique indexé, en mL/m ² ; FEVG : fraction d'éjection du ventricule gauche, en % ; masse indexée, en g/m ² Les données sont exprimées sous la forme moyenne ± écart-type ou sous la forme médiane (IQR). Valeur significative si $p < 0,05$ et notée *				

2. Cœur droit

Dans ce paragraphe, nous nous intéressons cette fois-ci aux différentes mesures côté cœur droit, et plus particulièrement du ventricule droit. Les résultats sont résumés dans les **tableaux 3-21**.

D'après le **tableau 3-21a**, nous pouvons constater que le volume télésystolique indexé du ventricule droit est significativement plus élevé dans le groupe triathlètes que dans le groupe contrôles et ce, pour V2 (39 (35 ; 45) vs 36 (32 ; 38) mL/m², $p = 0,048$) et V3 (40 ± 11 vs 35 ± 6 mL/m², $p = 0,029$). Le volume télédiastolique indexé est quant à lui significativement plus élevé chez les triathlètes que chez les contrôles, pour les trois visites (V1 : 97 ± 12 vs 85 ± 11 mL/m², $p < 0,001$; V2 : 99 ± 13 vs 83 ± 11 mL/m², $p < 0,001$; V3 : 95 ± 16 vs 83 ± 11 mL/m², $p = 0,001$). Ces observations sont superposables

pour le volume d'éjection systolique indexé (V1 : 57 (53 ; 62) vs 47 (45 ; 55) mL/m², $p < 0,001$; V2 : 59 ± 7 vs 47 ± 7 mL/m², $p < 0,001$; V3 : 55 (47 ; 61) vs 46 (43 ; 51) mL/m², $p < 0,001$). Enfin, la FEVD est significativement plus élevée chez les triathlètes et uniquement pour V2 (59 ± 6 vs 57 ± 3 %, $p = 0,042$).

Tableau 3-21a. Comparaison entre les deux groupes d'étude des mesures intéressant le ventricule droit, en fonction du numéro de visite

	Groupe Tri	Groupe Ctrl	<i>p</i> -value
Visite n°1			
VTS indexé	39 ± 9	37 ± 6	0,349
VTD indexé	97 ± 12	85 ± 11	< 0,001*
VES indexé	57 (53 ; 62)	47 (45 ; 55)	< 0,001*
FEVD	59 (55 ; 64)	57 (54 ; 59)	0,084
Visite n°2			
VTS indexé	39 (35 ; 45)	36 (32 ; 38)	0,048*
VTD indexé	99 ± 13	83 ± 11	< 0,001*
VES indexé	59 ± 7	47 ± 7	< 0,001*
FEVD	59 ± 6	57 ± 3	0,042*
Visite n°3			
VTS indexé	40 ± 11	35 ± 6	0,029*
VTD indexé	95 ± 16	83 ± 11	0,001*
VES indexé	55 (47 ; 61)	46 (43 ; 51)	< 0,001*
FEVD	58 ± 6	57 ± 4	0,422
VTS indexé : volume télésystolique indexé, en mL/m ² ; VTD indexé : volume télédiastolique indexé, en mL/m ² ; VES indexé : volume d'éjection systolique indexé, en mL/m ² ; FEVD : fraction d'éjection du ventricule droit, en % Les données sont exprimées sous la forme moyenne ± écart-type ou sous la forme médiane (IQR). Valeur significative si $p < 0,05$ et notée *			

Dans un second temps, nous proposons une comparaison longitudinale de ces mêmes paramètres et ce, dans chaque groupe d'étude (**tableau 3-21b**). On remarque que, quel que soit le groupe – Tri ou Ctrl, il n'y a pas de variation longitudinale significative des mesures intéressant le ventricule droit au cours de notre période de suivi.

Tableau 3-21b. Comparaison longitudinale pour chaque groupe d'étude, des mesures intéressant le ventricule droit

	Visite n°1	Visite n°2	Visite n°3	p-value
Groupe Triathlètes				
VTS indexé	39 ± 9	41 ± 10	40 ± 11	0,756
VTD indexé	97 ± 12	99 ± 13	95 ± 16	0,470
VES indexé	58 ± 8	59 ± 7	55 ± 8	0,115
FEVD	60 ± 6	59 ± 6	58 ± 6	0,506
Groupe Contrôles				
VTS indexé	37 ± 6	35 ± 6	35 ± 6	0,429
VTD indexé	85 ± 11	83 ± 11	83 ± 11	0,606
VES indexé	47 (45 ; 55)	46 (44 ; 51)	46 (43 ; 51)	0,338
FEVD	57 ± 4	57 ± 3	57 ± 4	0,952
VTS indexé : volume télésystolique indexé, en mL/m ² ; VTD indexé : volume télédiastolique indexé, en mL/m ² ; VES indexé : volume d'éjection systolique indexé, en mL/m ² ; FEVD : fraction d'éjection du ventricule droit, en % Les données sont exprimées sous la forme moyenne ± écart-type ou sous la forme médiane (IQR). Valeur significative si $p < 0,05$ et notée *				

3. Débits aortiques

Dans ce paragraphe, nous étudions les débits aortiques, toujours mesurés en IRM, mais évalués selon deux unités différentes : en millilitres par battement cardiaque (mL/batt) (**tableaux 3-22**) et en litres par minute (L/min) (**tableaux 3-23**). De plus, nous avons étudié ces deux paramètres avant et après la réalisation de deux minutes de battements de jambes associés à des mouvements rapides d'ouverture-fermeture des deux mains. Nous rappelons que ce petit effort a été réalisé dans l'IRM, en fin de protocole.

Tout d’abord, nous présentons dans les **tableaux 3-22** les résultats des mesures de fréquence cardiaque dans l’IRM avant et après cet effort.

D’après le **tableau 3-22a**, la fréquence cardiaque est significativement plus basse chez les triathlètes que chez les contrôles, pour toutes les visites, que ce soit avant l’effort (V1 : 57 ± 10 vs 66 ± 9 bpm, $p < 0,001$; V2 : 51 ± 8 vs 64 ± 9 bpm, $p < 0,001$; V3 : 56 ± 9 vs 66 ± 8 bpm, $p < 0,001$) ou après l’effort (V1 : 75 ± 12 vs 82 ± 13 bpm, $p = 0,019$; V2 : 68 ± 11 vs 82 ± 12 bpm, $p < 0,001$; V3 : 75 ± 12 vs 82 ± 12 bpm, $p = 0,033$). La variation absolue de fréquence cardiaque avant et après l’effort est quant à elle significativement plus élevée dans le groupe triathlètes et uniquement pour V3 (33 ($22 ; 48$) vs 19 ($14 ; 32$) %, $p = 0,008$).

Tableau 3-22a. Comparaison entre les deux groupes d’étude des fréquences cardiaques mesurées dans l’IRM avant et après l’effort, en fonction du numéro de visite

	Groupe Tri	Groupe Ctrl	p-value
Visite n°1			
FC avant	57 ± 10	66 ± 9	< 0,001*
FC après	75 ± 12	82 ± 13	0,019*
Variation	32 ± 14	25 ± 15	0,070
Visite n°2			
FC avant	51 ± 8	64 ± 9	< 0,001*
FC après	68 ± 11	82 ± 12	< 0,001*
Variation	30 (24 ; 40)	27 (17 ; 32)	0,228
Visite n°3			
FC avant	56 ± 9	66 ± 8	< 0,001*
FC après	75 ± 12	82 ± 12	0,033*
Variation	33 (22 ; 48)	19 (14 ; 32)	0,008*
FC : fréquence cardiaque, en bpm ; variation : variation relative de la fréquence cardiaque avant et après l’effort, en % Les données sont exprimées sous la forme moyenne \pm écart-type ou sous la forme médiane (IQR). Valeur significative si $p < 0,05$ et notée *			

Dans un second temps, nous proposons une comparaison longitudinale de ces mêmes paramètres et ce, dans chaque groupe d'étude (**tableau 3-22b**). On remarque qu'il existe une variation significative de la fréquence cardiaque au cours de la période de suivi chez les triathlètes, que ce soit avant l'effort ($p = 0,024$) ou après l'effort ($p = 0,025$). Or le **tableau 3-22c** nous indique qu'il n'existe pas de variation significative de la fréquence cardiaque entre les différentes visites.

Tableau 3-22b. Comparaison longitudinale pour chaque groupe d'étude, des fréquences cardiaques mesurées dans l'IRM avant et après l'effort

	Visite n°1	Visite n°2	Visite n°3	p-value
Groupe Triathlètes				
FC avant	55 (50 ; 64)	50 (47 ; 55)	56 (50 ; 60)	0,024*
FC après	75 ± 12	68 ± 11	75 ± 12	0,025*
Variation	30 (22 ; 39)	30 (24 ; 40)	33 (22 ; 48)	0,660
Groupe Contrôles				
FC avant	66 ± 9	64 ± 9	66 ± 8	0,624
FC après	82 ± 13	82 ± 12	82 ± 12	0,954
Variation	22 (15 ; 32)	27 (17 ; 32)	19 (14 ; 32)	0,312

FC : fréquence cardiaque, en bpm ; variation : variation relative de la fréquence cardiaque avant et après l'effort, en %
 Les données sont exprimées sous la forme moyenne ± écart-type ou sous la forme médiane (IQR). Valeur significative si $p < 0,05$ et notée *

Tableau 3-22c. Comparaison deux à deux des fréquences cardiaques mesurées dans l'IRM avant et après effort, dont l'évolution longitudinale s'est avérée précédemment significative

	V1 – V2 p-value	V2 – V3 p-value	V1 – V3 p-value
Groupe Triathlètes			
FC avant	0,219	0,219	0,846
FC après	0,383	0,383	0,782

FC : fréquence cardiaque, en bpm
 Valeur significative si $p < 0,05$ et notée *

Poursuivons avec les mesures des débits aortiques exprimées en mL/batt. D'après le **tableau 3-23a**, on note que les débits aortiques avant l'effort sont significativement plus élevés chez les triathlètes et ce, pour les trois visites (V1 : 108 ± 16 vs 87 ± 15 mL/batt, $p < 0,001$; V2 : 109 ± 16 vs 89 ± 17 mL/batt, $p < 0,001$; V3 : 103 ± 16 vs 87 ± 11 mL/batt, $p < 0,001$). Ces observations sont superposables pour les débits aortiques après l'effort (V1 : 111 ± 16 vs 92 ± 17 mL/batt, $p < 0,001$; V2 : 111 ± 13 vs 95 ± 18 mL/batt, $p < 0,001$; V3 : 103 ± 15 vs 90 ± 17 mL/batt, $p = 0,003$). Quant aux variations relatives des débits aortiques avant et après l'effort, il n'y a pas de différence significative et ce, quelle que soit la visite.

Tableau 3-23a. Comparaison entre les deux groupes d'étude des débits aortiques exprimés en mL/batt, en fonction du numéro de visite

	Groupe Tri	Groupe Ctrl	p-value
Visite n°1			
Débit Ao avant	108 ± 16	87 ± 15	< 0,001*
Débit Ao après	111 ± 16	92 ± 17	< 0,001*
Variation	2,7 (0,0 ; 9,7)	6,4 (-0,5 ; 11,7)	0,302
Visite n°2			
Débit Ao avant	109 ± 16	89 ± 17	< 0,001*
Débit Ao après	111 ± 13	95 ± 18	< 0,001*
Variation	0,0 (-5,2 ; 9,8)	2,1 (-2,4 ; 7,1)	0,533
Visite n°3			
Débit Ao avant	103 ± 16	87 ± 11	< 0,001*
Débit Ao après	103 ± 15	90 ± 17	0,003*
Variation	-1,1 (-6,4 ; 4,9)	-2,5 (-3,6 ; 4,6)	0,676
Débit Ao avant : débit aortique avant effort, en mL/batt ; Débit Ao après : débit aortique après effort, en mL/batt ; variation : variation relative du débit aortique exprimé en mL/batt avant et après l'effort, en % Les données sont exprimées sous la forme moyenne \pm écart-type ou sous la forme médiane (IQR). Valeur significative si $p < 0,05$ et notée *			

Dans un second temps, nous proposons une comparaison longitudinale de ces mêmes paramètres et ce, dans chaque groupe d'étude (**tableau 3-23b**). On remarque que les débits aortiques après effort chez les triathlètes montrent une variation significative au cours de la période de suivi ($p = 0,043$). Or, d'après le **tableau 3-23c**, il n'a pas été possible d'objectiver sur quelle période de notre suivi a eu lieu cette variation significative pour Tri. Cependant, les contrôles montrent une différence significative au cours de la période de suivi de la variation relative du débit aortique avant et après effort ($p = 0,027$), entre V1 et V3 ($p = 0,009$) uniquement et ce, d'après le **tableau 3-23c**.

Tableau 3-23b. Comparaison longitudinale pour chaque groupe d'étude, des débits aortiques exprimés en mL/batt

	Visite n°1	Visite n°2	Visite n°3	p-value
Groupe Triathlètes				
Débit Ao avant	108 ± 16	109 ± 16	104 ± 16	0,360
Débit Ao après	111 ± 16	111 ± 13	103 ± 15	0,043*
Variation	2,7 (0,0 ; 9,7)	0,0 (-5,2 ; 9,8)	-1,1 (-6,4 ; 4,9)	0,127
Groupe Contrôles				
Débit Ao avant	87 ± 15	89 ± 17	87 ± 11	0,742
Débit Ao après	87 (82 ; 102)	91 (81 ; 106)	85 (80 ; 96)	0,555
Variation	6,4 (-0,5 ; 11,7)	2,1 (-2,4 ; 7,1)	-2,5 (-3,6 ; 4,6)	0,027*
Débit Ao avant : débit aortique avant effort, en mL/batt ; débit Ao après : débit aortique après effort, en mL/batt ; variation : variation relative du débit aortique exprimé en mL/batt avant et après l'effort, en % Les données sont exprimées sous la forme moyenne ± écart-type ou sous la forme médiane (IQR). Valeur significative si $p < 0,05$ et notée *				

Tableau 3-23c. Comparaison deux à deux des débits aortiques exprimés en mL/batt, dont l'évolution longitudinale s'est avérée précédemment significative

	V1 – V2 p-value	V2 – V3 p-value	V1 – V3 p-value
Groupe Triathlètes			
Débit Ao après	0,716	0,267	0,267
Groupe Contrôles			
Variation	0,100	0,100	0,009*
Débit Ao après : débit aortique après effort, en mL/batt ; variation : variation relative du débit aortique exprimé en mL/batt avant et après l'effort, en % Valeur significative si $p < 0,05$ et notée *			

Continuons avec les mesures des débits aortiques exprimés cette fois-ci en L/min. D'après le **tableau 3-24a**, on note qu'il n'y a aucune différence significative, que ce soit en fonction du groupe d'appartenance, ou que ce soit en fonction du numéro de la visite. Nous y avons également associé une comparaison longitudinale de ces mêmes paramètres et ce, en fonction du groupe d'étude (**tableau 3-24b**). Il s'avère qu'il n'existe pas de variation significative de ces débits aortiques exprimés en L/min au cours de notre période de suivi, et ce quel que soit le groupe d'étude.

Tableau 3-24a. Comparaison entre les deux groupes d'étude des débits aortiques exprimés en L/min, en fonction du numéro de visite

	Groupe Tri	Groupe Ctrl	p-value
Visite n°1			
Débit Ao avant	5,9 ± 1,1	5,6 ± 0,8	0,234
Débit Ao après	5,9 (5,5 ; 6,8)	5,7 (5,1 ; 6,7)	0,517
Variation	8,1 ± 14,1	7,1 ± 12,1	0,776
Visite n°2			
Débit Ao avant	5,4 (5,2 ; 6,0)	5,3 (4,8 ; 6,1)	0,481
Débit Ao après	6,1 (5,0 ; 6,8)	5,9 (5,1 ; 6,9)	0,906
Variation	5,9 (-3,7 ; 17,0)	7,0 (2,7 ; 12,2)	0,616
Visite n°3			
Débit Ao avant	5,6 (5,2 ; 6,3)	5,5 (5,1 ; 5,9)	0,385
Débit Ao après	6,0 ± 1,0	5,7 ± 1,0	0,316
Variation	2,0 (-1,6 ; 12,9)	2,0 (-1,3 ; 9,3)	0,625
Débit Ao avant : débit aortique avant effort, en L/min ; Débit Ao après : débit aortique après effort, en L/min ; variation : variation relative du débit aortique exprimé en L/min avant et après l'effort, en % Les données sont exprimées sous la forme moyenne ± écart-type ou sous la forme médiane (IQR). Valeur significative si $p < 0,05$ et notée *			

Tableau 3-24b. Comparaison longitudinale pour chaque groupe d'étude, des débits aortiques exprimés en L/min

	Visite n°1	Visite n°2	Visite n°3	p-value
Groupe Triathlètes				
Débit Ao avant	5,8 (5,1 ; 6,5)	5,4 (5,2 ; 6,0)	5,6 (5,2 ; 6,3)	0,706
Débit Ao après	5,9 (5,5 ; 6,8)	6,1 (5,0 ; 6,8)	6,0 (5,6 ; 6,8)	0,806
Variation	8,1 ± 14,1	6,7 ± 13,1	5,4 ± 13,3	0,720
Groupe Contrôles				
Débit Ao avant	5,6 ± 0,8	5,5 ± 0,9	5,5 ± 0,7	0,937
Débit Ao après	5,7 (5,1 ; 6,7)	5,9 (5,1 ; 6,9)	5,5 (5,0 ; 6,2)	0,582
Variation	5,6 (2,1 ; 14,0)	7,0 (2,7 ; 12,2)	2,0 (-1,3 ; 9,3)	0,202
Débit Ao avant : débit aortique avant effort, en L/min ; Débit Ao après : débit aortique après effort, en L/min ; variation : variation relative du débit aortique exprimé en L/min avant et après l'effort, en % Les données sont exprimées sous la forme moyenne ± écart-type ou sous la forme médiane (IQR). Valeur significative si $p < 0,05$ et notée *				

4. Mesures du T1

Dans ce paragraphe, nous nous intéressons aux mesures du T1 selon différentes localisations dans le muscle cardiaque mais également dans deux muscles squelettiques. Les résultats sont rassemblés dans les **tableaux 3-25**.

D'après le **tableau 3-25a**, on observe une augmentation significative du T1 du septum interventriculaire dans le groupe contrôles par rapport au groupe triathlètes et ce, pour les trois visites (V1 : 1216 ± 28 vs 1234 ± 27 ms, $p = 0,011$; V2 : 1216 ± 23 vs 1239 ± 21 ms, $p < 0,001$; V3 : 1223 ± 27 vs 1237 ± 27 ms, $p = 0,045$). Le T1 de la zone de jonction entre le ventricule droit et le septum interventriculaire est lui aussi significativement plus élevé dans le groupe Ctrl comparativement au groupe Tri mais uniquement à V2 (1230 ± 22 vs 1244 ± 29 ms, $p = 0,043$). Le T1 du muscle dorsal est significativement plus bas chez les triathlètes à V1 uniquement (1064 (1013 ; 1112) vs 1102 (1071 ; 1132) ms, $p = 0,022$). Enfin, le T1 du muscle pectoral est significativement plus bas dans le groupe triathlètes à V1 (1102 ± 37 vs 1122 ± 40 ms, $p = 0,049$) et V2 (1091 ± 36 vs $1111 \pm$

43 ms, $p = 0,048$), tandis que le T1 du sang ventriculaire ne montre aucune différence significative entre nos deux groupes ni en fonction du numéro de la visite.

Tableau 3-25a. Comparaison entre les deux groupes d'étude des mesures du T1, en fonction du numéro de visite

	Groupe Tri	Groupe Ctrl	<i>p</i> -value
Visite n°1			
Septum IV	1216 ± 28	1234 ± 27	0,011*
Septum/VD	1228 ± 29	1242 ± 27	0,053
Sang ventri.	1864 ± 51	1851 ± 65	0,382
M. pectoral	1102 ± 37	1122 ± 40	0,049*
M. dorsal	1064 (1013 ; 1112)	1102 (1071 ; 1132)	0,022*
Visite n°2			
Septum IV	1216 ± 23	1239 ± 21	< 0,001*
Septum/VD	1230 ± 22	1244 ± 29	0,043*
Sang ventri.	1901 ± 59	1879 ± 47	0,117
M. pectoral	1091 ± 36	1111 ± 43	0,048*
M. dorsal	1088 (1040 ; 1118)	1105 (1071 ; 1126)	0,122
Visite n°3			
Septum IV	1223 ± 27	1237 ± 27	0,045*
Septum/VD	1238 ± 22	1239 ± 28	0,874
Sang ventri.	1881 ± 50	1868 ± 57	0,376
M. pectoral	1100 (1050 ; 1123)	1116 (1096 ; 1143)	0,087
M. dorsal	1071 (1023 ; 1128)	1091 (1017 ; 1125)	0,905
Septum IV : septum interventriculaire ; septum/VD : zone de jonction entre le septum interventriculaire et le ventricule droit ; sang ventri. : sang intraventriculaire gauche ; M. pectoral : muscle pectoral ; M. dorsal : muscle dorsal. Valeurs du T1 exprimées en ms Les données sont exprimées sous la forme moyenne ± écart-type ou sous la forme médiane (IQR). Valeur significative si $p < 0,05$ et notée *			

Dans un second temps, nous avons réalisé une comparaison longitudinale de ces mêmes paramètres et ce, dans chaque groupe d'étude (**tableau 3-25b**) et avons constaté que la seule variation significative des mesures du T1 au cours de la période de suivi était celles du sang ventriculaire chez les triathlètes ($p = 0,023$). Le **tableau 3-25c** nous permet de constater que cette variation significative intervient entre V1 et V2 ($p = 0,018$).

Tableau 3-25b. Comparaison longitudinale pour chaque groupe d'étude, des mesures du T1

	Visite n°1	Visite n°2	Visite n°3	p-value
Groupe Triathlètes				
Septum IV	1221 (1201 ; 1237)	1216 (1204 ; 1231)	1225 (1211 ; 1240)	0,288
Septum/VD	1228 ± 29	1230 ± 22	1238 ± 22	0,236
Sang ventri.	1864 ± 51	1901 ± 59	1881 ± 50	0,023*
M. pectoral	1110 (1076 ; 1124)	1095 (1070 ; 1109)	1100 (1050 ; 1123)	0,315
M. dorsal	1064 (1013 ; 1112)	1088 (1040 ; 1118)	1071 (1023 ; 1128)	0,564
Groupe Contrôles				
Septum IV	1234 ± 27	1340 ± 21	1237 ± 27	0,742
Septum/VD	1242 ± 27	1244 ± 29	1239 ± 28	0,804
Sang ventri.	1851 ± 65	1879 ± 47	1868 ± 57	0,182
M. pectoral	1132 (1102 ; 1152)	1114 (1090 ; 1137)	1116 (1096 ; 1143)	0,484
M. dorsal	1102 (1071 ; 1132)	1105 (1071 ; 1126)	1091 (1017 ; 1125)	0,328
<p>Septum IV : septum interventriculaire ; septum/VD : zone de jonction entre le septum interventriculaire et le ventricule droit ; sang ventri. : sang intraventriculaire gauche ; M. pectoral : muscle pectoral ; M. dorsal : muscle dorsal. Valeurs de T1 exprimées en ms</p> <p>Les données sont exprimées sous la forme moyenne ± écart-type ou sous la forme médiane (IQR). Valeur significative si $p < 0,05$ et notée *</p>				

Tableau 3-25c. Comparaison deux à deux des mesures du T1, dont l'évolution longitudinale s'est avérée précédemment significative

	V1 – V2 <i>p</i>-value	V2 – V3 <i>p</i>-value	V1 – V3 <i>p</i>-value
Groupe Triathlètes Sang ventri.	0,018*	0,176	0,199
Sang ventri. : sang intraventriculaire gauche Valeur significative si $p < 0,05$ et notée *			

C. Analyse des paramètres artériels

1. Compliance artérielle centrale

Dans ce paragraphe, nous allons aborder les mesures de section aortique puis les calculs de la compliance et de la distensibilité aortiques. Les mesures ont été réalisées au niveau de l'aorte thoracique ascendante mais aussi au niveau de l'aorte thoracique descendante.

a. Aorte thoracique ascendante

D'après le **tableau 3-26a**, on observe une section aortique minimale plus élevée dans le groupe Triathlètes lors de V1 uniquement ($6,26 \pm 1,00$ vs $5,71 \pm 1,09$ cm², $p = 0,048$). Quant à la section aortique maximale, elle est significativement plus élevée dans le groupe Tri lors de V1 ($7,73 \pm 1,02$ vs $7,04 \pm 1,26$ cm², $p = 0,023$) et de V2 ($7,74 \pm 1,00$ vs $6,97 \pm 1,21$ cm², $p = 0,010$). Enfin, le *strain* aortique qui représente la variation relative de cette section aortique, n'est pas significativement différent entre les deux groupes et lors des différentes visites.

Tableau 3-26a. Comparaison entre les deux groupes d'étude des sections de l'aorte thoracique ascendante, en fonction du numéro de visite

	Groupe Tri	Groupe Ctrl	p-value
Visite n°1			
Ao min	6,26 ± 1,00	5,71 ± 1,09	0,048*
Ao max	7,73 ± 1,02	7,04 ± 1,26	0,023*
Strain aortique	25 ± 7	23 ± 6	0,367
Visite n°2			
Ao min	5,77 (5,20 ; 6,80)	5,63 (4,94 ; 6,24)	0,291
Ao max	7,74 ± 1,00	6,97 ± 1,21	0,010*
Strain aortique	26 (18 ; 41)	23 (18 ; 30)	0,225
Visite n°3			
Ao min	6,08 ± 1,19	5,83 ± 1,15	0,417
Ao max	7,70 ± 1,12	7,11 ± 1,26	0,063
Strain aortique	25 (20 ; 32)	22 (19 ; 26)	0,096
Ao min : section aortique minimale, en cm ² ; Ao max : section aortique maximale, en cm ² ; strain aortique en % Les données sont exprimées sous la forme moyenne ± écart-type ou sous la forme médiane (IQR). Valeur significative si $p < 0,05$ et notée *			

Dans un second temps, nous avons réalisé une comparaison longitudinale de ces mêmes paramètres et ce, dans chaque groupe d'étude (**tableau 3-26b**) et avons constaté qu'il n'existait pas de différence significative au cours de la période de suivi dans nos deux groupes.

Tableau 3-26b. Comparaison longitudinale pour chaque groupe d'étude, des sections de l'aorte thoracique ascendante

	Visite n°1	Visite n°2	Visite n°3	p-value
Groupe Triathlètes				
Ao min	6,26 ± 1,00	6,07 ± 1,16	6,08 ± 1,19	0,758
Ao max	7,46 (7,18 ; 8,29)	7,46 (7,11 ; 8,34)	7,63 (6,77 ; 8,30)	0,986
Strain aortique	26 (20 ; 29)	26 (18 ; 41)	25 (20 ; 32)	0,723
Groupe Contrôles				
Ao min	5,71 ± 1,09	5,65 ± 1,16	5,83 ± 1,15	0,830
Ao max	7,04 ± 1,26	6,97 ± 1,21	7,11 ± 1,26	0,921
Strain aortique	23 ± 6	25 ± 9	22 ± 7	0,608
Ao min : section aortique minimale, en cm ² ; Ao max : section aortique maximale, en cm ² ; strain aortique en %				
Les données sont exprimées sous la forme moyenne ± écart-type ou sous la forme médiane (IQR). Valeur significative si $p < 0,05$ et notée *				

Poursuivons avec les mesures de compliance et de distensibilité, que nous avons calculées avec deux mesures de pression pulsée différentes : une provenant des mesures par SphygmoCor® donc centrale notée c, et la seconde provenant des mesures de pression artérielle périphérique réalisées pendant l'IRM notée p. Les résultats sont présentés dans les **tableaux 3-27**.

D'après le **tableau 3-27a**, seule la compliance aortique calculée avec la valeur périphérique de la pression pulsée apparaît comme significative à V2 et à V3. Plus précisément, elle est plus élevée dans le groupe triathlètes que dans le groupe contrôles (V2 : $3,85 \pm 1,19$ vs $3,25 \pm 0,88 \cdot 10^{-2}$ cm²/mmHg, $p = 0,032$; V3 : $3,85 \pm 1,09$ vs $3,25 \pm 0,92 \cdot 10^{-2}$ cm²/mmHg, $p = 0,027$). A noter que la compliance aortique centrale à V3 a une p-value proche de 0,05 mais non significative ($p = 0,061$).

Tableau 3-27a. Comparaison entre les deux groupes d'étude des compliances et des distensibilités de l'aorte thoracique ascendante, en fonction du numéro de visite

	Groupe Tri	Groupe Ctrl	p-value
Visite n°1			
Compliance (c)	4,15 ± 0,85	4,01 ± 1,23	0,614
Compliance (p)	3,56 ± 0,84	3,25 ± 0,80	0,144
Distensibilité (c)	0,69 ± 0,19	0,71 ± 0,24	0,650
Distensibilité (p)	0,59 ± 0,18	0,57 ± 0,15	0,696
Visite n°2			
Compliance (c)	4,33 (3,84 ; 5,46)	4,04 (3,19 ; 4,88)	0,249
Compliance (p)	3,85 ± 1,19	3,25 ± 0,88	0,032*
Distensibilité (c)	0,73 (0,52 ; 1,06)	0,73 (0,53 ; 0,94)	0,780
Distensibilité (p)	0,60 (0,42 ; 0,90)	0,57 (0,42 ; 0,72)	0,502
Visite n°3			
Compliance (c)	4,12 (3,47 ; 5,46)	4,03 (2,91 ; 4,47)	0,061
Compliance (p)	3,85 ± 1,09	3,25 ± 0,92	0,027*
Distensibilité (c)	0,71 (0,57 ; 0,85)	0,65 (0,47 ; 0,84)	0,381
Distensibilité (p)	0,57 (0,48 ; 0,75)	0,56 (0,46 ; 0,68)	0,388
Compliance, en 10 ⁻² cm ² /mmHg ; distensibilité, en mmHg ⁻¹ ; c : utilisation de la pression pulsée centrale ; p : utilisation de la pression pulsée périphérique			
Les données sont exprimées sous la forme moyenne ± écart-type ou sous la forme médiane (IQR). Valeur significative si p < 0,05 et notée *			

Dans un second temps, nous avons réalisé une comparaison longitudinale de ces mêmes paramètres et ce, dans chaque groupe d'étude (**tableau 3-27b**) et avons constaté qu'il n'existait pas de différence significative au cours de la période de suivi dans nos deux groupes. Notons même le très peu de variabilité de la compliance aortique calculée avec la pression pulsée périphérique chez les contrôles ($p > 0,999$).

Tableau 3-27b. Comparaison longitudinale pour chaque groupe d'étude, des compliances et des distensibilités de l'aorte thoracique ascendante

	Visite n°1	Visite n°2	Visite n°3	p-value
Groupe Triathlètes				
Compliance (c)	4,16 (3,51 ; 4,71)	4,33 (3,84 ; 5,46)	4,12 (3,47 ; 5,46)	0,487
Compliance (p)	3,42 (2,98 ; 4,21)	3,72 (3,07 ; 4,55)	3,76 (3,08 ; 4,41)	0,465
Distensibilité (c)	0,63 (0,57 ; 0,79)	0,73 (0,52 ; 1,06)	0,71 (0,57 ; 0,85)	0,639
Distensibilité (p)	0,56 (0,47 ; 0,64)	0,60 (0,42 ; 0,90)	0,59 (0,48 ; 0,75)	0,685
Groupe Contrôles				
Compliance (c)	4,01 ± 1,23	4,18 ± 1,38	3,81 ± 1,11	0,558
Compliance (p)	3,25 ± 0,80	3,25 ± 0,88	3,25 ± 0,92	> 0,999
Distensibilité (c)	0,71 ± 0,24	0,78 ± 0,34	0,67 ± 0,21	0,319
Distensibilité (p)	0,57 ± 0,15	0,60 ± 0,22	0,57 ± 0,16	0,730
Compliance, en 10 ⁻² cm ² /mmHg ; distensibilité, en mmHg ⁻¹ ; c : utilisation de la pression pulsée centrale ; p : utilisation de la pression pulsée périphérique				
Les données sont exprimées sous la forme moyenne ± écart-type ou sous la forme médiane (IQR). Valeur significative si <i>p</i> < 0,05 et notée *				

b. Aorte thoracique descendante

D'après le **tableau 3-28a**, on constate que les sections minimales de l'aorte thoracique descendante sont significativement plus élevées chez les triathlètes que chez les contrôles et ce, pour toutes les visites (V1 : 3,40 (3,10 ; 4,03) vs 3,17 (2,77 ; 3,59) cm², *p* = 0,038 ; V2 : 3,57 ± 0,76 vs 3,21 ± 0,57 cm², *p* = 0,044 ; V3 : 3,54 ± 0,59 vs 3,14 ± 0,51 cm², *p* = 0,008). Cette observation est superposable pour les sections maximales (V1 : 4,61 ± 0,74 vs 4,04 ± 0,67 cm², *p* = 0,003 ; V2 : 4,55 ± 0,78 vs 4,02 ± 0,63 cm², *p* = 0,005 ; V3 : 4,40 (3,95 ; 4,89) vs 3,88 (3,71 ; 3,99) cm², *p* = 0,003). Enfin, le *strain* aortique qui représente la variation relative de cette section aortique, n'est pas significativement différent entre les deux groupes et ce, quelle que soit la visite.

Tableau 3-28a. Comparaison entre les deux groupes d'étude des sections de l'aorte thoracique descendante, en fonction du numéro de visite

	Groupe Tri	Groupe Ctrl	p-value
Visite n°1			
Ao min	3,40 (3,10 ; 4,03)	3,17 (2,77 ; 3,59)	0,038*
Ao max	4,61 ± 0,74	4,04 ± 0,67	0,003*
Strain aortique	28 (19 ; 31)	24 (20 ; 30)	0,901
Visite n°2			
Ao min	3,57 ± 0,76	3,21 ± 0,57	0,044*
Ao max	4,55 ± 0,78	4,02 ± 0,63	0,005*
Strain aortique	26 ± 8	26 ± 9	0,881
Visite n°3			
Ao min	3,54 ± 0,59	3,14 ± 0,51	0,008*
Ao max	4,40 (3,95 ; 4,89)	3,88 (3,71 ; 3,99)	0,003*
Strain aortique	25 ± 8	27 ± 8	0,398
Ao min : section aortique minimale, en cm ² ; Ao max : section aortique maximale, en cm ² ; strain aortique en % Les données sont exprimées sous la forme moyenne ± écart-type ou sous la forme médiane (IQR). Valeur significative si p < 0,05 et notée *			

Dans un second temps, nous avons réalisé une comparaison longitudinale de ces mêmes paramètres et ce, dans chaque groupe d'étude (**tableau 3-28b**) et avons constaté qu'il n'existait pas de différence significative au cours de la période de suivi dans nos deux groupes.

Tableau 3-28b. Comparaison longitudinale pour chaque groupe d'étude, des sections de l'aorte thoracique descendante

	Visite n°1	Visite n°2	Visite n°3	p-value
Groupe Triathlètes				
Ao min	3,58 ± 0,75	3,57 ± 0,76	3,54 ± 0,59	0,963
Ao max	4,61 ± 0,74	4,55 ± 0,78	4,47 ± 0,64	0,737
Strain aortique	28 (19 ; 31)	23 (21 ; 33)	24 (22 ; 29)	0,865
Groupe Contrôles				
Ao min	3,19 ± 0,54	3,21 ± 0,57	3,14 ± 0,51	0,876
Ao max	3,92 (3,59 ; 4,27)	3,91 (3,67 ; 4,28)	3,88 (3,71 ; 3,99)	0,933
Strain aortique	24 (20 ; 30)	24 (20 ; 33)	28 (20 ; 33)	0,860
Ao min : section aortique minimale, en cm ² ; Ao max : section aortique maximale, en cm ² ; strain aortique en % Les données sont exprimées sous la forme moyenne ± écart-type ou sous la forme médiane (IQR). Valeur significative si p < 0,05 et notée *				

Poursuivons avec les mesures de compliance et de distensibilité, que nous avons calculées avec deux mesures de pression pulsée différentes : une provenant des mesures par SphygmoCor[®] donc centrale notée c, et la seconde provenant des mesures de pression artérielle périphérique réalisées pendant l'IRM notée p. Les résultats sont présentés dans les **tableaux 3-29**.

D'après le **tableau 3-29a**, aucune des compliances ou des distensibilités de l'aorte thoracique descendante ne montre de différence significative entre les triathlètes et les contrôles et ce, quel que soit le numéro de la visite.

Tableau 3-29a. Comparaison entre les deux groupes d'étude des compliances et des distensibilités de l'aorte thoracique descendante, en fonction du numéro de visite

	Groupe Tri	Groupe Ctrl	p-value
Visite n°1			
Compliance (c)	2,82 (2,16 ; 3,05)	2,33 (2,00 ; 2,90)	0,189
Compliance (p)	2,19 (1,88 ; 2,66)	1,94 (1,72 ; 2,19)	0,062
Distensibilité (c)	0,71 ± 0,21	0,80 ± 0,26	0,180
Distensibilité (p)	0,62 ± 0,19	0,65 ± 0,22	0,510
Visite n°2			
Compliance (c)	2,59 (2,03 ; 3,27)	2,41 (2,05 ; 2,90)	0,537
Compliance (p)	2,27 ± 0,75	2,00 ± 0,64	0,144
Distensibilité (c)	0,62 (0,56 ; 0,86)	0,76 (0,60 ; 1,05)	0,197
Distensibilité (p)	0,56 (0,45 ; 0,70)	0,59 (0,49 ; 0,78)	0,398
Visite n°3			
Compliance (c)	2,48 (1,95 ; 2,91)	2,42 (1,97 ; 2,96)	0,946
Compliance (p)	1,88 (1,69 ; 2,50)	2,08 (1,64 ; 2,62)	0,982
Distensibilité (c)	0,64 (0,57 ; 0,84)	0,80 (0,62 ; 1,04)	0,210
Distensibilité (p)	0,55 (0,47 ; 0,65)	0,71 (0,48 ; 0,85)	0,173
Compliance, en 10 ⁻² cm ² /mmHg ; distensibilité, en mmHg ⁻¹ ; c : utilisation de la pression pulsée centrale ; p : utilisation de la pression pulsée périphérique Les données sont exprimées sous la forme moyenne ± écart-type ou sous la forme médiane (IQR). Valeur significative si p < 0,05 et notée *			

Dans un second temps, nous avons réalisé une comparaison longitudinale de ces mêmes paramètres et ce, dans chaque groupe d'étude (**tableau 3-29b**) et avons constaté qu'il n'existait pas de différence significative au cours de la période de suivi dans nos deux groupes.

Tableau 3-29b. Comparaison longitudinale pour chaque groupe d'étude, des compliances et des distensibilités de l'aorte thoracique descendante

	Visite n°1	Visite n°2	Visite n°3	<i>p-value</i>
Groupe Triathlètes				
Compliance (c)	2,82 (2,16 ; 3,05)	2,59 (2,03 ; 3,27)	2,48 (1,95 ; 2,91)	0,686
Compliance (p)	2,19 (1,88 ; 2,66)	2,22 (1,70 ; 2,85)	1,88 (1,69 ; 2,50)	0,504
Distensibilité (c)	0,68 (0,59 ; 0,84)	0,62 (0,56 ; 0,86)	0,64 (0,57 ; 0,84)	0,964
Distensibilité (p)	0,61 (0,46 ; 0,73)	0,56 (0,45 ; 0,70)	0,55 (0,47 ; 0,65)	0,910
Groupe Contrôles				
Compliance (c)	2,33 (2,00 ; 2,90)	2,41 (2,05 ; 2,90)	2,42 (1,97 ; 2,96)	0,911
Compliance (p)	1,94 (1,72 ; 2,19)	1,91 (1,65 ; 2,26)	2,08 (1,64 ; 2,62)	0,817
Distensibilité (c)	0,80 ± 0,26	0,82 ± 0,31	0,82 ± 0,29	0,938
Distensibilité (p)	0,61 (0,51 ; 0,80)	0,59 (0,49 ; 0,78)	0,71 (0,48 ; 0,85)	0,727
Compliance, en 10 ² cm ² /mmHg ; distensibilité, en mmHg ⁻¹ ; c : utilisation de la pression pulsée centrale ; p : utilisation de la pression pulsée périphérique				
Les données sont exprimées sous la forme moyenne ± écart-type ou sous la forme médiane (IQR). Valeur significative si <i>p</i> < 0,05 et notée *				

2. Compliance et résistance artérielles périphériques

Dans ce paragraphe, nous allons nous intéresser aux calculs de la compliance artérielle totale mais également de la résistance artérielle totale. Le **tableau 3-30a** nous apprend que seule la compliance artérielle totale est significativement plus élevée chez les triathlètes à V1 (1,95 ± 0,44 vs 1,65 ± 0,34 mL/mmHg, *p* = 0,005) et à V2 (2,04 ± 0,45 vs 1,62 ± 0,34 mL/mmHg, *p* < 0,001). A noter qu'à V3, la *p-value* était proche de 0,05 (*p* = 0,057). Le **tableau 3-30b** montre qu'il n'existe pas de variation significative, que ce soit de la compliance artérielle totale ou de la résistance artérielle totale, au cours de notre période de suivi, que ce soit chez les triathlètes ou chez les contrôles.

Tableau 3-30a. Comparaison entre les deux groupes d'étude des compliances et résistances artérielles totales, en fonction du numéro de visite

	Groupe Tri	Groupe Ctrl	p-value
Visite n°1			
TAC	1,95 ± 0,44	1,65 ± 0,34	0,005*
TPVR	1,84 ± 0,41	2,00 ± 0,52	0,212
Visite n°2			
TAC	2,04 ± 0,45	1,62 ± 0,34	< 0,001*
TPVR	1,93 ± 0,48	2,06 ± 0,43	0,293
Visite n°3			
TAC	2,03 (1,54 ; 2,29)	1,62 (1,50 ; 1,87)	0,057
TPVR	1,82 ± 0,43	1,96 ± 0,37	0,227
TAC : total arterial compliance, en mL/mmHg ; TPVR : total peripheral vascular resistance, en 10 ² mmHg.min/L			
Les données sont exprimées sous la forme moyenne ± écart-type ou sous la forme médiane (IQR). Valeur significative si p < 0,05 et notée *			

Tableau 3-30b. Comparaison longitudinale pour chaque groupe d'étude, des compliances et résistances artérielles totales

	Visite n°1	Visite n°2	Visite n°3	p-value
Groupe Triathlètes				
TAC	1,95 ± 0,44	2,04 ± 0,45	2,00 ± 0,54	0,711
TPVR	1,84 ± 0,41	1,93 ± 0,48	1,82 ± 0,43	0,601
Groupe Contrôles				
TAC	1,65 ± 0,34	1,62 ± 0,34	1,70 ± 0,33	0,716
TPVR	1,86 (1,67 ; 2,11)	2,02 (1,81 ; 2,29)	1,88 (1,66 ; 2,16)	0,571
TAC : total arterial compliance, en mL/mmHg ; TPVR : total peripheral vascular resistance, en 10 ² mmHg.min/L				
Les données sont exprimées sous la forme moyenne ± écart-type ou sous la forme médiane (IQR). Valeur significative si p < 0,05 et notée *				

D. Analyse des paramètres du couplage ventriculo-aortique

Pour ce dernier paragraphe dédié aux résultats de notre étude, nous allons aborder les paramètres de travail cardiaque mais également de couplage ventriculo-aortique.

Commençons tout d'abord avec les paramètres du travail cardiaque (**tableaux 3-31**). On constate que le *stroke volume* est significativement plus élevé chez les triathlètes et pour toutes les visites (V1 : 85 ± 18 vs 68 ± 15 mL, $p < 0,001$; V2 : 88 ± 16 vs 65 ± 12 mL, $p < 0,001$; V3 : 83 ± 18 vs 66 ± 12 mL, $p < 0,001$). Ces observations sont superposables pour le *stroke work* (V1 : $6,9 \pm 1,2$ vs $5,7 \pm 1,1$ L.mmHg, $p < 0,001$; V2 : $7,2 \pm 1,3$ vs $5,3 \pm 1,0$ L.mmHg, $p < 0,001$; V3 : $6,5 \pm 1,2$ vs $5,4 \pm 0,9$ L.mmHg, $p < 0,001$). Enfin, l'index cardiaque est significativement plus bas dans le groupe Tri et ce, pour les visites V2 ($3,1 \pm 0,6$ vs $3,5 \pm 0,5$ L/min/m², $p = 0,007$) et V3 ($3,2 \pm 0,6$ vs $3,5 \pm 0,5$ L/min/m², $p = 0,011$) uniquement.

Tableau 3-31a. Comparaison entre les deux groupes d'étude des paramètres du travail cardiaque, en fonction du numéro de visite

	Groupe Tri	Groupe Ctrl	p-value
Visite n°1			
<i>Stroke volume</i>	85 ± 18	68 ± 15	< 0,001*
Index cardiaque	3,3 (2,9 ; 3,6)	3,5 (3,3 ; 3,8)	0,133
<i>Stroke work</i>	$6,9 \pm 1,2$	$5,7 \pm 1,1$	< 0,001*
Visite n°2			
<i>Stroke volume</i>	88 ± 16	65 ± 12	< 0,001*
Index cardiaque	$3,1 \pm 0,6$	$3,5 \pm 0,5$	0,007*
<i>Stroke work</i>	$7,2 \pm 1,3$	$5,3 \pm 1,0$	< 0,001*
Visite n°3			
<i>Stroke volume</i>	83 ± 18	66 ± 12	< 0,001*
Index cardiaque	$3,2 \pm 0,6$	$3,5 \pm 0,5$	0,011*
<i>Stroke work</i>	$6,5 \pm 1,2$	$5,4 \pm 0,9$	< 0,001*
<i>Stroke volume</i> ou volume d'éjection systolique, en mL ; index cardiaque en L/min/m ² ; <i>stroke work</i> en L.mmHg			
Les données sont exprimées sous la forme moyenne \pm écart-type ou sous la forme médiane (IQR). Valeur significative si $p < 0,05$ et notée *			

Dans un second temps, nous avons réalisé une comparaison longitudinale de ces mêmes paramètres et ce, dans chaque groupe d'étude (**tableau 3-31b**) et avons constaté qu'il n'existait pas de différence significative au cours de la période de suivi dans nos deux groupes. Notons toutefois que le *stroke work* chez les triathlètes présente une *p-value* proche de 0,05 ($p = 0,052$).

Tableau 3-31b. Comparaison longitudinale pour chaque groupe d'étude, des paramètres du travail cardiaque

	Visite n°1	Visite n°2	Visite n°3	<i>p-value</i>
Groupe Triathlètes				
<i>Stroke volume</i>	85 ± 18	88 ± 16	83 ± 18	0,574
Index cardiaque	3,3 (2,9 ; 3,6)	3,0 (2,8 ; 3,5)	3,1 (2,7 ; 3,5)	0,246
<i>Stroke work</i>	6,9 ± 1,2	7,2 ± 1,3	6,5 ± 1,2	0,052
Groupe Contrôles				
<i>Stroke volume</i>	68 ± 15	65 ± 12	66 ± 12	0,648
Index cardiaque	3,5 ± 0,5	3,5 ± 0,5	3,5 ± 0,5	0,765
<i>Stroke work</i>	5,7 ± 1,1	5,3 ± 1,0	5,4 ± 0,9	0,442
<i>Stroke volume</i> ou volume d'éjection systolique, en mL ; index cardiaque en L/min/m ² ; <i>stroke work</i> en L.mmHg				
Les données sont exprimées sous la forme moyenne ± écart-type ou sous la forme médiane (IQR). Valeur significative si $p < 0,05$ et notée *				

Terminons avec les paramètres du couplage ventriculo-aortique. Le **tableau 3-32a** montre que l'élastance artérielle est significativement diminuée chez les triathlètes et pour les trois visites (V1 : 1,16 (1,04 ; 1,40) vs 1,46 (1,27 ; 1,65) mmHg/mL, $p < 0,001$; V2 : 1,15 (0,97 ; 1,35) vs 1,55 (1,34 ; 1,80) mmHg/mL, $p < 0,001$; V3 : 1,23 ± 0,30 vs 1,48 ± 0,28 mmHg/mL, $p = 0,003$). Ces observations sont superposables pour l'élastance ventriculaire (V1 : 0,89 (0,82 ; 0,98) vs 1,00 (0,86 ; 1,12) mmHg/mL, $p = 0,034$; V2 : 0,89 (0,78 ; 0,95) vs 0,93 (0,86 ; 1,11) mmHg/mL, $p = 0,020$; V3 : 0,90 ± 0,14 vs 0,99 ± 0,18 mmHg/mL, $p = 0,047$) mais également pour le couplage ventriculo-aortique (V1 : 1,35 ± 0,21 vs 1,54 ± 0,20, $p = 0,001$; V2 : 1,35 ± 0,26 vs 1,58 ± 0,16, $p < 0,001$; V3 : 1,35 ± 0,26 vs 1,55 ± 0,20, $p = 0,002$). Enfin, nous avons réalisé une comparaison longitudinale de ces mêmes paramètres (**tableau 3-32b**) et avons constaté qu'il n'existait pas de différence significative au cours de la période de suivi dans nos deux groupes

Tableau 3-32a. Comparaison entre les deux groupes d'étude des paramètres du couplage ventriculo-aortique, en fonction du numéro de visite

	Groupe Tri	Groupe Ctrl	p-value
Visite n°1			
Ea	1,16 (1,04 ; 1,40)	1,46 (1,27 ; 1,65)	< 0,001*
Ev	0,89 (0,82 ; 0,98)	1,00 (0,86 ; 1,12)	0,034*
Couplage VA	1,35 ± 0,21	1,54 ± 0,20	0,001*
Visite n°2			
Ea	1,15 (0,97 ; 1,35)	1,55 (1,34 ; 1,80)	< 0,001*
Ev	0,89 (0,78 ; 0,95)	0,93 (0,86 ; 1,11)	0,020*
Couplage VA	1,35 ± 0,26	1,58 ± 0,16	< 0,001*
Visite n°3			
Ea	1,23 ± 0,30	1,48 ± 0,28	0,003*
Ev	0,90 ± 0,14	0,99 ± 0,18	0,047*
Couplage VA	1,35 ± 0,26	1,55 ± 0,20	0,002*
Ea : élastance artérielle, en mmHg/mL ; Ev : élastance ventriculaire, mmHg/mL ; couplage VA : couplage ventriculo-aortique, sans dimension Les données sont exprimées sous la forme moyenne ± écart-type ou sous la forme médiane (IQR). Valeur significative si $p < 0,05$ et notée *			

Tableau 3-32b. Comparaison longitudinale pour chaque groupe d'étude, des paramètres du couplage ventriculo-aortique

	Visite n°1	Visite n°2	Visite n°3	p-value
Groupe Triathlètes				
Ea	1,16 (1,04 ; 1,40)	1,15 (0,97 ; 1,35)	1,17 (1,00 ; 1,45)	0,790
Ev	0,89 ± 0,12	0,88 ± 0,11	0,90 ± 0,14	0,821
Couplage VA	1,33 (1,21 ; 1,46)	1,27 (1,18 ; 1,51)	1,27 (1,17 ; 1,49)	0,884
Groupe Contrôles				
Ea	1,46 (1,27 ; 1,65)	1,55 (1,34 ; 1,80)	1,50 (1,29 ; 1,59)	0,750
Ev	1,00 (0,86 ; 1,12)	0,93 (0,86 ; 1,11)	1,00 (0,85 ; 1,06)	0,932
Couplage VA	1,54 ± 0,20	1,58 ± 0,16	1,55 ± 0,20	0,722
Ea : élastance artérielle, en mmHg/mL ; Ev : élastance ventriculaire, mmHg/mL ; couplage VA : couplage ventriculo-aortique, sans dimension Les données sont exprimées sous la forme moyenne ± écart-type ou sous la forme médiane (IQR). Valeur significative si $p < 0,05$ et notée *				

Pour résumer cette troisième partie

Nous avons pu recruter 34 triathlètes et leurs 29 volontaires sains appariés sur le sexe et l'âge, respectant l'ensemble des critères d'inclusion. Nous avons pu proposer une estimation de la pratique sportive passée dans nos deux groupes d'étude, prenant en considération le volume horaire accumulé mais également la dépense énergétique accumulée sur la même période, largement majorée chez les triathlètes.

Nous avons proposé une étude de la structure de l'entraînement des triathlètes, tant sous un aspect qualitatif que quantitatif. Nous avons généré une étude descriptive pour chaque discipline – natation, vélo, course à pied – mais également pour chaque type de séance – endurance, seuil, fractionné, PMA-VMA, récupération technique.

Nous avons également pu réaliser un monitoring de l'entraînement des triathlètes selon la méthode des TRIMPS. Nous nous sommes aperçus que les deux à trois mois d'avant-course étaient source de nombreuses variations dans la structure de l'entraînement.

Dans les suites des explorations menées en tonométrie d'aplanation, nous avons pu mettre en évidence qu'il existait des différences entre les mesures de pression artérielle périphérique et les mesures de pression artérielle centrale, tant au sein des deux groupes qu'au cours des trois visites. Nous avons également montré qu'il existait une différence significative de la vitesse de l'onde de pouls entre les triathlètes et les contrôles, mais qu'il pouvait également exister une variation longitudinale de ce paramètre chez les triathlètes.

Suite aux explorations menées durant le temps consacré à l'IRM, l'analyse des mesures de pression artérielle périphérique nous a conduit à comparer toutes les mesures de pression artérielle que nous avons réalisées – périphériques et centrales – et avons relevé qu'il existait des différences significatives entre toutes. Ce constat a donc soulevé l'existence d'un biais de mesure dans nos résultats, qui doit être pris en considération dans nos conclusions.

Nous avons pu confirmer l'augmentation attendue des paramètres fonctionnels ventriculaires gauches et droits chez les triathlètes, ces modifications restant stables dans le temps à l'échelle de l'étude. Toutefois, nous restons interrogateurs quant à l'interprétation des valeurs obtenues.

Sur le plan de la compliance aortique, nous avons pu mettre en évidence une certaine différence entre les triathlètes et les contrôles, sans variation longitudinale. Nous rappelons toutefois que ces

calculs ont été impactés par les différences relevées en termes de pression artérielle et qu'il sera nécessaire de discuter cet aspect dans la quatrième partie.

Enfin, nous avons pu mettre en lumière l'amélioration de certains marqueurs du travail cardiaque en faveur des triathlètes, mais également du couplage ventriculo-aortique.

Notre travail n'a pas pu confirmer pleinement l'objectif principal de cette étude qui était de mettre en évidence une variation significative nette de la compliance aortique – ou indirectement de la rigidité artérielle – des triathlètes au cours de la saison sportive, selon plusieurs modalités d'étude. Toutefois, nous avons pu mettre en avant l'existence de certains biais de mesure qui mériteraient réflexion dans l'optique de futurs travaux. Certains paramètres sont néanmoins en faveur de modifications adaptatives à l'exercice soutenu, favorables pour les triathlètes, dont la cinétique ne semble pas avoir été en adéquation avec l'échelle temporelle de notre protocole. Nous proposons donc de discuter ces différents éléments dans la prochaine partie.

Partie 4 : Discussion

Le protocole de recherche COATRI a été bâti dans les suites des travaux de Master 2 du Dr Anne-Charlotte e et portant sur le même thème de recherche, à savoir l'étude de la compliance aortique dans une population de triathlètes amateurs longue distance. Par conséquent, les résultats de cette étude pilote ainsi que les remarques qui nous ont été faites lors de présentations en congrès nous ont permis d'améliorer notre méthodologie. Par exemple, nous avons assuré un suivi longitudinal tout au long de la saison sportive et de tous nos volontaires – triathlètes ET contrôles – avec trois temps de mesure. De plus, nous avons pu travailler avec une deuxième équipe de recherche pour réaliser de manière non invasive des mesures de pression artérielle centrale et ce, afin d'optimiser les calculs de la compliance aortique (84). Nous proposons donc dans cette partie de discuter de nos résultats mais également des innovations et des pistes d'amélioration de ce protocole.

I. Population d'étude et méthodologie

A. Sélection de nos volontaires

Au total, nous avons pu inclure 34 triathlètes et 29 volontaires contrôles pour un objectif fixé initialement à 35 participants dans chacun des deux groupes. Au vu des différentes études présentées, nous sommes satisfaits d'avoir pu recruter autant de sujets d'étude sportifs pour un sport individuel comme le triathlon. Même si ce sport est en plein développement, il n'a pas été aisé de recruter nos triathlètes par voie d'affichage. Nous avons dû trouver d'autres alternatives pour inclure suffisamment de personnes, ce qui a conduit au décalage dans le temps de notre période d'inclusion. De plus, le triathlon longue distance ne concerne qu'une petite partie des compétiteurs dans ce sport et que le critère de performance que nous avons exigé, à la manière de Yann LE MEUR

dans ses travaux de recherche (144) conduits quelques années plus tôt, a complexifié notre recrutement.

Ce dernier a également été un problème pour notre population contrôle. En effet, il a été difficile de trouver des volontaires qui répondaient à tous les critères d'inclusion – volontaire insuffisamment actif selon la définition de l'OMS, Index de Masse Corporelle inférieur à 25 kg/m², absence de pathologie cardio-vasculaire ou de traitement chronique entre autres – et qui correspondaient à l'appariement sur l'âge dont nous avons besoin suite à la pré-sélection de nos sportifs.

Nous avons fait le choix de réaliser séparément notre appel à volontaires pour les triathlètes puis pour les contrôles. Peut-être devrions-nous reconsidérer cet aspect méthodologique pour nos travaux futurs en organisant en parallèle et un peu plus en amont de l'étude, la pré-sélection des deux populations.

B. Méthodologie de notre protocole

Sur le plan méthodologique, nous pouvons nous réjouir d'avoir compilé les données de 183 visites pour l'ensemble de nos volontaires et pour nos trois temps de mesure, avec très peu de personnes n'ayant pas complété au moins une visite sur les trois (moins de 5 sur 63). Nous souhaitons mettre en avant le fait que notre protocole est innovant dans la mesure où il a permis de réaliser un suivi longitudinal de nos triathlètes durant l'ensemble d'une saison sportive et ce, versus contrôle. Ajoutons également que nous avons fait appel à une modalité d'imagerie qui se démarque par sa reproductibilité de mesure d'un individu à l'autre, à savoir l'IRM cardio-vasculaire (145,146). De plus, cette dernière offre la possibilité de combiner l'étude morphologique mais également fonctionnelle (147) tant du muscle cardiaque dans son ensemble, que des gros vaisseaux centraux comme l'aorte. De ce fait, nous allons pouvoir élargir notre réflexion au couplage ventriculo-aortique chez les athlètes d'endurance. Enfin, comme nous le mentionnions plus tôt, nous avons pu associer notre expérience dans la recherche en imagerie cardio-vasculaire à celle d'une seconde équipe

experte dans la recherche portant sur la rigidité artérielle, dans le but de compléter nos travaux portant sur la compliance aortique chez le sportif.

Bien que nous ayons maximisé la planification des visites de nos différents volontaires en fonction notamment des disponibilités des différentes équipes et du matériel dédié à la recherche, mais également en fonction du calendrier sportif qui nous était de facto imposé, il n'en demeure pas moins des améliorations possibles à étudier pour des travaux futurs. Même si une certaine forme de priorité a été donnée à notre protocole, ce dernier a toutefois nécessité un important volume de temps dédié à la recherche en IRM, sans compter les quelques pannes auxquelles nous avons eu à faire. Par exemple, nous pensons qu'il serait plus appréciable pour l'ensemble des protagonistes de fixer un calendrier dès les premières semaines de l'étude et ce, pour toute la durée du protocole. De ce fait, cette option permettrait à un volontaire de réaliser toutes ses visites le matin, ou l'après-midi, et donc de s'affranchir d'une variabilité circadienne des mesures de pression artérielle (148) ; mais également de réaliser dans le même ordre IRM puis tonométrie, ou tonométrie puis IRM, afin de limiter d'éventuelles modifications des paramètres de pression artérielle et de fréquence cardiaque liées au déplacement d'un site de mesure à l'autre.

C. Analyse de la pratique sportive passée

Dans le cadre de ce protocole, nous avons également voulu étudier la pratique sportive actuelle et passée de nos volontaires. En effet, la littérature fait état de plusieurs travaux déclarant que la pratique sportive débutée dans l'enfance a un impact sur le remodelage cardio-vasculaire futur (106,149,150). De plus, le volume d'entraînement cumulé sur une vie apparaît comme un facteur de risque de pathologie cardio-vasculaire induite (151), lorsqu'il excède par exemple les 3000 heures dans cette étude de Elliott et al. (56). Or il est encore difficile d'arrêter formellement un volume horaire à ne pas dépasser tant les facteurs influençant le remodelage cardio-vasculaire sont nombreux (152) – âge, sexe, sport pratiqué, volume d'entraînement, intensité, stress, génétique, facteur environnemental ... – et que la caractérisation précise de leur rôle à jouer

est encore peu précise. C'est pourquoi nous avons rédigé un questionnaire de vie sportive visant à quantifier la pratique sportive de nos participants, ce qui est intéressant sur un plan épidémiologique. Grâce à ce travail, nous espérons identifier quelques pistes pour caractériser les habitudes d'entraînement des personnes pratiquant un sport de manière régulière mais également pour comprendre davantage la dynamique de la physiologie cardio-vasculaire liée à l'exercice.

Ce recensement s'est d'ailleurs fait à deux niveaux. Le premier a consisté en une évaluation en termes d'heures d'entraînement cumulées durant la vie de nos volontaires. Le second a permis quant à lui une quantification davantage énergétique de la pratique sportive, car exprimé en unités métaboliques (MET), prenant en considération le sport pratiqué mais également l'intensité à laquelle a été soumis régulièrement l'individu. Pour cela, nous avons utilisé le Compendium des Activités Physiques (108,109), qui indique tel un référentiel le coût énergétique d'une activité physique donnée. De ce fait, nous avons pu proposer une première approximation intéressante de la pratique sportive cumulée exprimée en MET, d'individus non professionnels âgés de 19 à 39 ans au moment de l'étude. Considérant ces données, nous pensons qu'il serait utile d'étendre les recherches visant à déterminer cette notion de volume horaire de sport cumulé sur une vie délétère pour le cœur, au concept de MET cumulées sur une vie. De cette manière, l'impact de l'intensité de certaines activités sportives répétées dans le temps, pourrait être étudié dans le développement au long cours de pathologies cardio-vasculaires exercice-induites (153).

II. Entraînement de nos triathlètes

A. Environnement de notre analyse

1. Réflexions autour de notre protocole

Nous rappelons que le traitement de l'ensemble des agendas du sportif ont permis de cumuler un nombre total de 1687 séances pour 2347 heures d'entraînement sur une période de suivi de 16 mois. Présentée telle quelle, cette analyse ne prend cependant pas en compte la planification de l'entraînement à moyen terme en fonction de l'échéance sportive. En effet, dans le milieu sportif, on observe plusieurs périodes pour lesquelles l'objectif principal est différent :

- travailler sa forme physique globale durant la période hivernal – c'est d'ailleurs au cours de cette phase de préparation qu'a eu lieu la première visite pour nos triathlètes (V1) ;
- se préparer spécifiquement pour une compétition donnée, le but de cette planification étant d'arriver à un pic de forme deux à trois semaines avant l'objectif sportif – d'où la réalisation de la seconde visite à cette date (V2) ;
- récupérer des sollicitations sportives passées en réduisant globalement sa charge d'entraînement sur plusieurs semaines ou mois, avant de reprendre le travail de fond hivernal en vue de la saison sportive suivante – c'est pour cela que la troisième visite (V3) devait avoir lieu au cours de cette période « d'entre-deux ».

Nous aurions aimé que tous nos triathlètes observent une phase de repos complet de deux ou trois mois mais la majorité a continué à s'entraîner de façon régulière tout en réduisant volume et intensité d'entraînement. La visite V3 a donc été réalisée environ trois mois après le début de l'allègement de l'entraînement et avant la reprise du travail hivernal. Il est difficile pour un athlète qui s'entraîne régulièrement tout au long de l'année, de s'arrêter pendant plusieurs mois sans raison médicale ; d'autant plus pour un sport polyvalent comme le triathlon, pour lequel il est facile de trouver des compétitions toute l'année (bike and run, duathlon ...) et donc des raisons de s'entraîner, y compris en dehors de tout enchaînement (traversée de lac à la nage durant l'été, trail en période hivernale ...).

De plus, ce type d'estimation présenté au tout début de ce paragraphe s'affranchit de la variabilité d'entraînement que nous confère le triathlon rapporté aux conditions climatiques de notre région. En effet, les triathlètes corses par exemple auront davantage la possibilité de bénéficier d'un temps clément tout au long de l'année, leur permettant davantage de sorties de vélo sur route ou

davantage de natation en mer. Il en va de même pour la saison de compétition. Par conséquent, il est important de préciser dans quelle région géographique le recueil des données a eu lieu mais également de proposer une méthode d'étude des data qui prenne en compte cette variabilité saisonnière dans la planification de l'entraînement. En effet, certains choix sportifs se feront en fonction de la saison. C'est pourquoi dans notre analyse, nous avons souhaité présenter les différents résultats en fonction du mois de suivi. De ce fait, nous avons pu établir une certaine forme d'harmonisation entre les athlètes, athlètes qui n'avaient pas de plus jeté leur dévolu sur la même course de référence. Pour s'affranchir de ce paramètre, il aurait fallu choisir des athlètes qui prenaient le départ de courses se tenant sur un même mois de l'année par exemple, ce qui aurait complexifié davantage le recrutement et la réalisation des visites de suivi, notamment V2.

Enfin, pour ne pas perdre certains paramètres liés à la planification de l'entraînement en fonction de la saison à venir, nous avons opté pour une technique d'extrapolation des données recueillies sur une semaine par mois, de manière à obtenir une estimation de la charge et du contenu de l'entraînement sur un mois. En effet, cette technique a permis de rendre un peu plus significatifs à l'échelle mensuelle, des éléments ponctuels recueillis à l'échelle hebdomadaire, et donc des résultats davantage exploitables dans notre réflexion.

2. Etude des données d'entraînement

A notre connaissance, ce protocole est le premier à compiler des données d'entraînement de triathlètes amateurs qui se dédient à la pratique longue distance (distance L ou half-ironman, et au-delà) sur une période aussi longue de près d'une année. De plus, ces données sont issues de la pratique de terrain, c'est-à-dire qu'elles ne sont pas le fruit d'un planning d'entraînement imposé dans le cadre de l'étude. Elles reflètent donc parfaitement ce que réalise le sportif dans son environnement quotidien et habituel. Notons toutefois que, dans notre effectif, certains triathlètes avaient des connaissances plus fournies en matière d'entraînement du fait de leur métier ou de leur engagement en tant qu'encadrant bénévole au sein d'un club de triathlon, ce qui a pu modifier la planification : séances plus longues ou plus intenses, davantage de récupération ... Il aurait été intéressant de savoir quels triathlètes étaient accompagnés par un entraîneur personnel

dans le cadre de la préparation de leur objectif sportif, ou encore de savoir si ce professionnel utilisait des outils de suivi de l'entraînement, comme ceux que nous avons choisis.

Comme nous voulions étudier la charge d'entraînement de nos triathlètes, il nous a donc fallu trouver un outil qui nous permette cette analyse mais surtout qui puisse combiner la charge externe avec la charge interne. Nous avons pensé utiliser un cardiofréquencemètre pour obtenir des données précises mais surtout objectives tout au long de la période de suivi. Aujourd'hui, avec les montres connectées et le suivi en ligne des séances d'entraînement, il aurait été envisageable de récupérer ces data. Toutefois, tous les athlètes ne s'entraînent pas forcément avec un cardiofréquencemètre. De plus, certains utilisent un capteur thoracique, qui offre une qualité d'enregistrement des données de fréquence cardiaque très satisfaisante, tandis que d'autres athlètes utilisent des cardiofréquencemètres avec capteur au poignet, capteur pour lequel il peut exister certaines imprécisions notamment en cas de fréquence cardiaque élevée (154). Nous nous exposons alors à un risque de données incomplètes voire insuffisantes. Nous avons donc poursuivi nos recherches et avons finalement arrêté notre choix sur la méthode des TRIMPS (155) qui permet également de générer des paramètres composites du monitoring de la charge d'entraînement et de la forme de l'athlète, paramètres que nous avons pu calculer. Enfin, nous souhaitons également rappeler que ce score RPE utilisé dans la méthode des TRIMPS est fortement corrélé à la fréquence cardiaque (156). Ce dernier élément nous a donc paru décisif dans notre choix en faveur de l'utilisation des TRIMPS et non en faveur du cardiofréquencemètre.

Pour cela, nous avons confectionné un agenda d'entraînement dédié à notre étude et que nous avons remis à chaque triathlète. Chacun devait y inscrire au cours de la semaine toutes les différentes séances d'entraînement réalisées même si, idéalement, nous aurions préféré qu'ils nous répertorient un suivi détaillé pour TOUTES les semaines de la période de suivi. Mais nous avons craint que cette demande soit trop contraignante et que nos volontaires se démobilisent, ce qui aurait entraîné une baisse significative de la qualité des données récupérées. C'est pourquoi nous avons opté pour un compromis acceptable, à savoir consigner les données de la semaine d'entraînement la plus représentative durant chaque mois de la période de suivi. De ce fait, nous avons donc pu exploiter complètement 25 agendas sur les 34 espérés soit 74 %, ce qui reste satisfaisant.

3. Éléments généraux de notre analyse

D'une manière générale, nos triathlètes s'entraînent de manière relativement régulière tout au long de l'année y compris en période hivernale, autour de 25 séances mensuelles en moyenne, et observent une phase d'entraînement un peu moins chargée après avoir accompli leur course de référence pour l'année. Toutefois, cette observation n'est pas totalement superposable à l'évolution du volume d'entraînement. Nous avons identifié trois phases correspondant à la période de préparation hivernale (30 h par mois), à la période de préparation à l'objectif pour laquelle le volume d'entraînement augmente de près de deux tiers (50 h par mois), puis à la période post-objectif pour laquelle ce volume diminue (25 h par mois).

Une vision très large nous permet de constater que cette variabilité en termes de volume d'entraînement est probablement liée à l'augmentation de la pratique du vélo durant la période de préparation à l'objectif. En parallèle, nous avons pu remarquer que le volume d'entraînement dédié à la course à pied est, en proportions relatives, plus important en période hivernale tandis que la pratique de la natation reste stable tout au long de l'année, proportionnellement au volume d'entraînement total.

Quelques mots pour finir sur la pratique compétitive de nos triathlètes. Il semblerait que ces derniers profitent d'une partie de la période de préparation à l'objectif pour prendre part à quelques compétitions, à raison d'une à deux par mois en moyenne. En effet, ces rendez-vous sont l'occasion de faire le point sur l'état de forme en conditions réelles de pratique ou encore pour optimiser ses stratégies de course en termes d'allure ou de nutrition. Notons enfin que certains volontaires ont poursuivi leur pratique de la compétition en post-objectif et que quasiment aucun d'entre eux ne s'est adonné à une course au cours de la période hivernale.

Pour conclure, nous pouvons affirmer que nos triathlètes observent globalement un nombre de séances relativement similaire tout au long de l'année hors période post-objectif pour laquelle ce nombre diminue quelque peu. En parallèle, le volume d'entraînement est quant à lui majoré d'au moins 50 % durant la période de préparation à l'objectif pour laquelle on observe une augmentation importante du volume d'entraînement relatif dédié à la pratique du vélo. Enfin, nos triathlètes restent des compétiteurs réguliers profitant de la période d'entraînement hors travail de fond hivernal pour se mesurer à d'autres athlètes.

B. Synthèse par discipline

Nous rappelons que dans ce paragraphe, toutes les données présentées sont issues de l'extrapolation dont la méthodologie a été expliquée dans la partie III – Résultats.

1. Natation

En termes de nombre de séances dédiées à la natation en piscine, nous avons pu observer que les triathlètes vont profiter de la période hivernale pour augmenter leur nombre de séances dédiées à la natation. Ce nombre diminuera par la suite au profit d'autres disciplines comme le vélo par exemple. Cette constatation est également applicable au volume d'entraînement mensuel moyen. Ceci s'explique par la stabilité tout au long de la période de suivi de la durée moyenne d'une séance, soit globalement entre 50 et 60 minutes.

Pour un triathlète, la pratique de la natation ne se limite pas qu'à la pratique en piscine. En effet, le triathlon se déroulant essentiellement en eau libre, il est important pour un compétiteur de s'entraîner en conditions réelles de course. Nous avons pu observer que la pratique en eau libre est concentrée sur six mois de l'année, soit d'avril à septembre environ pour notre étude. Cette observation est à corréliser aux conditions climatiques de notre région mais également au fait que tous les triathlètes n'ont pas forcément accès à un lieu autorisé pour la pratique en eau libre. De plus, cette dernière est relativement limitée puisqu'elle représente à peine une sortie mensuelle d'environ 25 à 30 minutes en général.

Par conséquent, nous pouvons affirmer que le triathlète s'entraîne à plus de 90 % de son temps en bassin intérieur (piscine) alors que c'est un sport de compétition qui se joue quasi exclusivement en eau libre. Il est également intéressant de remarquer que l'entraînement de natation est plus important au cours de la période de préparation hivernale et que la durée des séances reste globalement stable tout au long de l'année, sous la barre des 60 minutes.

2. Vélo

Nous pouvons constater que l'augmentation du nombre de séances de cyclisme sur route se fait sur la période de fin de travail de fond hivernal et jusqu'à la fin de la période de préparation à l'objectif. En parallèle, l'évolution du volume d'entraînement suit celle du nombre de séances. En termes de durée moyenne d'une séance, celle-ci évolue entre 100 et 140 minutes tout au long de la période de suivi, excepté au cours de la période de travail de fond hivernal pour laquelle la durée d'une séance est réduite. Au vu de ces éléments, nous pouvons supposer que la pratique du cyclisme sur route va s'accroître d'une manière générale au fur et à mesure de l'avancée de l'athlète dans sa préparation à l'objectif. Cependant, il faut garder à l'esprit que les conditions météorologiques – routes glissantes en hiver, jour d'averse ou de canicule – vont impacter la pratique : report ou suppression d'une séance, changement de modalités d'entraînement au profit du home trainer, raccourcissement d'une séance ...

Nous en venons donc à parler de la pratique du vélo sur home trainer, qui semble compléter celle du vélo sur route, mais avec une pratique au cours de la préparation à l'objectif et en post-objectif plutôt anecdotique. En effet, on note davantage de séances au cours de la période de travail de fond hivernal et au début de la période de préparation à l'objectif. Le volume horaire mensuel oscille quant à lui sur cette même période. Ceci peut s'expliquer par une durée de séance assez variable tout au long de l'année estimée entre 50 et 100 minutes, soit du simple au double en fonction de la période de suivi.

Terminons avec la pratique du VTT qui semble encore plus limitée que celle de la pratique sur home trainer, que ce soit en termes de nombre de séances ou en termes de volume horaire, avec une heure mensuelle tout au plus au cours de la période de suivi. Toutefois, la durée d'une séance peut considérablement varier puisqu'estimée de 30 à 140 minutes voire plus, ponctuellement.

Pour conclure sur l'ensemble des éléments dédiés à la pratique du vélo dans sa globalité, nous observons une augmentation de la pratique du cyclisme sur route concomitante à la période de préparation à l'objectif. Cette modalité semble être complétée par la pratique du home trainer et/ou du VTT, que ce soit ponctuellement au cours de cette même période ou de manière un peu plus importante au cours de la période de travail de fond hivernal. Cette hypothèse est probablement à mettre en lien avec les conditions climatiques.

3. Course à pied

Pour la course à pied sur route, nous pouvons d'ores et déjà signaler que le nombre de séances évolue tout au long de l'année, avec une recrudescence durant la période hivernale. Cette observation est relativement superposable à l'évolution du volume d'entraînement moyen au cours de la période de suivi. Cette tendance peut s'expliquer par une durée de séance qui varie entre 50 et 70 minutes en fonction de la période de l'année.

En plus de la course à pied sur route, le triathlète peut également s'entraîner en pleine nature (trail). Toutefois, à l'image du home trainer ou du VTT pour le vélo, la pratique du trail reste relativement anecdotique, avec quasiment moins d'une heure d'entraînement mensuelle tout au long de la période de suivi. À noter néanmoins que la durée d'une séance de trail varie elle aussi entre 50 et 70 minutes.

Pour conclure, nous pouvons affirmer que la pratique de la course à pied reste relativement stable dans ses différents aspects au cours de la période de suivi hors période de travail de fond hivernal. En effet, au cours de cette dernière, nous avons remarqué que la pratique de la course à pied était accrue. Enfin, on soulignera que la pratique du trail reste tout à fait ponctuelle chez nos triathlètes.

4. PPG et autres activités

Nous pouvons prétendre que le recours à la préparation physique généralisée est relativement anecdotique et irrégulière pour nos triathlètes. Il semblerait donc que cet aspect de l'entraînement ne soit pas encore une habitude pour notre population. En ce qui concerne les autres activités, elles semblent davantage relever de la pratique occasionnelle de loisir en fonction de la saison (ski de fond l'hiver par exemple) mais également des périodes de vacances.

C. Synthèse par type de séance

Dans ce paragraphe, nous proposons une discussion autour du type de séance. Tout au long de l'année, les séances d'endurance représentent au moins 50 % du volume total d'entraînement. On observe d'ailleurs une augmentation progressive du volume d'entraînement dédié à l'endurance au cours de la préparation à l'objectif et ce, en faveur du vélo, discipline qui s'octroie près des deux tiers du temps passé à s'entraîner pour ce type de séance. En effet, on peut supposer que le recours au vélo est la solution la plus adaptée pour développer son endurance au cours de séances de longue durée – pouvant avoisiner les 2h30 à 3h00 par sortie à cette période de l'année, comparativement à la course à pied ou à la natation. Rappelons également que lors d'une compétition de triathlon longue distance, le vélo représente la partie la plus longue de la course – entre 2h45 et 4h00 en fonction du niveau, devant la course à pied et puis la natation ; d'où la nécessité de passer beaucoup de temps d'entraînement sur sa machine.

Parallèlement, nous avons observé une augmentation du volume d'entraînement dédié aux séances de seuil lors de la préparation à l'objectif. On constate que la proportion allouée au vélo et à la course à pied pour ce type de séance est relativement équivalente. Comme les séances de seuil visent à développer l'allure de course des athlètes, il est donc normal que ce type de séance soit répété en vue de l'objectif sportif à venir.

En complément, le triathlète doit également développer ses capacités de résistance à la fatigue grâce aux séances de fractionné par exemple, séances essentiellement suivies au cours de la préparation à l'objectif mais également ... en post-objectif ! Ce dernier élément peut peut-être s'expliquer par la préparation de quelques courses isolées en fin de saison, comme les *bike and run* ou encore les courses à pied. En effet, ce type d'épreuve peut générer plus rapidement de la fatigue métabolique compte tenu de vitesses de course plus élevées et de temps de course plus courts, que lors d'un triathlon longue distance.

Passons aux séances de PMA-VMA, davantage réalisées en période hivernale. Nous aurions pu penser que nos athlètes affectionnaient plus particulièrement ce type de séance au cours de la préparation à l'objectif. Nous supposons donc qu'ils ont davantage profité de la période hivernale pour développer progressivement leur vitesse en course à pied et leur puissance à vélo.

Pour continuer, les séances de récupération semblent plutôt plébiscitées au cours de la préparation à l'objectif puis dans le mois qui suit la course de référence, ce qui semble en adéquation avec la nécessité d'alléger régulièrement le planning d'entraînement afin de dissiper la fatigue générée. Notons que pour ce type de séance relativement courte, le vélo semble être le plus choisi. Nous formulons l'hypothèse que ce sport en décharge ne génère qu'une faible contrainte physique, peu traumatisante, et qu'il est également de faible contrainte technique, par opposition à la natation qui exige malgré toute une certaine rigueur du geste et de la respiration.

Ce dernier aspect nous permet de faire la transition avec les séances de technique et de conclure sur le fait que celles-ci sont quasiment l'exclusivité de la natation, discipline pour laquelle la qualité du geste est fondamentale dans la quête de performance.

En conséquence, le triathlon étant un sport d'endurance, nous pouvons constater que nos athlètes semblent manier les différents types de séance pour développer au mieux l'ensemble des qualités dont ils ont besoin pour boucler un triathlon longue distance dans les objectifs qu'ils se sont imposés. Ils savent également optimiser leur recours en fonction de la temporalité de la saison sportive mais aussi en fonction des différentes disciplines et autres adaptations qui leur sont proposées par ce sport, comme le home trainer ou encore le trail.

D. Monitoring de l'entraînement

Dans ce paragraphe, nous allons revenir sur les données issues du monitoring de l'entraînement selon la méthode des TRIMPS.

1. Paramètres individuels

Tout d'abord, nous nous sommes intéressés au nombre hebdomadaire de séances d'entraînement, qui augmente au fur et à mesure qu'on approche de l'objectif. Toutefois, les variabilités interindividuelles restent relativement stables au cours de cette période de préparation, certains athlètes réalisant plus de séances que d'autres. Nous avons d'ailleurs relevé que certains étaient habitués à réaliser régulièrement deux séances quotidiennes. Ces observations sont toutefois différentes pour la période post-objectif, qui affiche globalement une diminution du nombre de séances hebdomadaires, mais pour laquelle la variabilité est plus importante. Ceci traduit possiblement le fait que certains athlètes vont profiter de cette période pour se focaliser sur d'autres objectifs sportifs secondaires de fin de saison, comme des courses à pied ou des trails, tandis que d'autres vont en profiter pour diminuer très nettement l'entraînement. Enfin, la période hivernale semble relativement stable en termes de nombre de séances hebdomadaires mais montre également une variabilité moindre.

Poursuivons avec le nombre de jours de repos observés chaque semaine par nos triathlètes. En moyenne, celui-ci est compris entre un et deux sur les périodes hivernale et de préparation à l'objectif. Au vu des écarts-types observés – stables sur la période de préparation à l'objectif, nos athlètes ne semblent pas tenter de sacrifier leurs jours de repos au profit de l'entraînement au cours de cette période. Outre le temps post-objectif pour lequel il est accepté par nos sportifs d'observer généralement davantage de jours de repos, cette question au cours de la période hivernale semble moins tranchée, avec un nombre qui diminue et une variabilité interindividuelle qui fluctue. Cette observation peut traduire le fait que nos triathlètes reprennent un certain rythme d'entraînement après une période post-objectif un peu plus allégée.

Passons au volume d'entraînement hebdomadaire qui évolue en trois phases au cours de la période de suivi. On observe un premier plateau de volume d'entraînement moyen sur la période hivernale et en début de préparation à l'objectif, avec une variabilité interindividuelle relativement similaire d'un mois à l'autre. En d'autres termes, les habitudes des triathlètes semblent relativement superposables au cours de cette première période.

La seconde phase s'articule durant la période de préparation à l'objectif, avec une augmentation progressive du volume d'entraînement hebdomadaire sous la forme d'une pyramide centrée sur le deuxième mois avant la course de référence (M-2), mois qui affiche une variabilité interindividuelle nettement majorée. Nous y voyons là un changement majeur de paradigme dans les habitudes d'entraînement de nos athlètes, comme s'il fallait augmenter drastiquement et d'un seul coup le volume d'entraînement pour être prêt pour la course deux mois plus tard. Nous ne pouvons d'ailleurs expliquer ni la raison ni l'intérêt de cette observation, en comparaison avec les principes de périodisation de l'entraînement (157) et de pic de forme à l'approche de l'objectif principal d'une saison sportive.

Enfin, la troisième phase correspond à la période post-objectif pour laquelle le volume d'entraînement hebdomadaire est diminué et reste stable au cours des quatre mois. Par conséquent, nous suggérons que la structure de l'entraînement de nos athlètes, bien qu'elle connaisse une certaine variabilité interindividuelle, affiche très peu de variabilité intra-individuelle durant cette période.

Continuons avec la durée moyenne d'une séance d'entraînement observée à l'échelle d'une semaine et toujours en fonction du mode de suivi. Nous observons toujours trois phases d'évolution mais quelque peu différentes de la description précédente. La première tient compte de la période hivernale et de préparation à l'objectif jusqu'à M-3, pour laquelle on relève une augmentation très progressive de la durée moyenne d'une séance – de 60 à 90 minutes. La deuxième phase se concentre sur les trois mois les plus proches de l'objectif principal (M-2 à M0). Cette fois-ci, on constate que la durée moyenne d'une séance a passé la barre des 100 minutes et que les écarts-types sont davantage majorés, notamment à M-2 encore une fois. La troisième phase correspond à la période post-objectif pour laquelle on observe une durée de séance moyenne d'augmentation progressive après un décrochage M+1 (70 minutes environ). Nous interprétons ces éléments de la façon suivante : les athlètes vont progressivement allonger la durée de leur séance au cours de la période hivernale et de préparation à l'objectif principal ; puis, après une petite coupure dans les suites de la course référence, réallongent progressivement la durée de leur séance en vue d'objectifs sportifs secondaires de fin de saison par exemple. Encore une fois, nous ne pouvons pas expliquer cet important écart d'évolution au cours de la période M-2 – M0.

Prolongeons notre discussion avec le RPE, qui affiche généralement des valeurs moyennes plutôt stables comprises entre 5 et 6 durant la période de préparation à l'objectif, et entre 4 et 5 en dehors, ce qui indique que nos triathlètes ont bien augmenté l'intensité de leur effort en vue de la course de référence. La variabilité interindividuelle de ce paramètre semble toutefois légèrement plus élevée au cours de la période dite post-objectif, ce qui peut correspondre encore une fois à phase de préparation d'objectifs sportifs secondaires.

Nous finissons avec le sRPE – le produit du volume d'entraînement en minutes par le RPE non nul – dont l'évolution des valeurs moyennes suit celle des valeurs moyennes du volume d'entraînement hebdomadaire et ce, en fonction du mois de suivi. Nous pensons cependant que l'évolution relativement harmonieuse du RPE tout au long de la période de suivi a quelque peu lissé les différents décrochages et autres écarts observés précédemment dans l'évolution du volume d'entraînement hebdomadaire en fonction du mois de suivi.

Pour conclure, nous pouvons affirmer que nos triathlètes vont adapter leur nombre de séances d'entraînement ainsi que l'intensité des différentes sessions en fonction des objectifs sportifs, principal et/ou secondaire(s). Il est d'ailleurs rassurant de constater que nos volontaires n'ont pas tendance à réduire leur repos au profit de leur volume d'entraînement à l'approche de l'objectif principal, et qu'ils savent également un peu « lever le pied » une fois venue la fin de saison. Néanmoins, nous souhaitons évoquer que nos sportifs peuvent avoir des modes d'entraînement différents. Entendons par là que certains sont des habitués du « multiséance quotidien » plusieurs fois dans la semaine, lorsque d'autres ne réalisent qu'une seule séance par jour voire tout au plus un enchaînement vélo-course à pied durant le week-end. Cette habitude peut être selon nous un facteur de risque de récupération insuffisante. Cette suggestion peut également expliquer au moins partiellement, certaines évolutions de l'entraînement et notamment le pic majeur que nous avons observé de façon isolée à M-2, que ce soit en termes de volume d'entraînement ou en termes de durée de séance, sans que nous ayons une explication tangible à cela.

2. Paramètres composites

Dans ce paragraphe, nous proposons une réflexion autour des différents paramètres du monitoring de l'entraînement selon la méthode des TRIMPS, à savoir le *weekly training load* (WTL), la *monotony*, le *strain* et le *fitness*.

D'une manière générale, les valeurs moyennes du WTL sont en-dessous de la zone d'entraînement optimal de 3000 à 5000 unités (113), sauf durant une partie de la période de préparation à l'objectif. Cependant, l'étude des écarts-types associés montre que cette zone peut être franchie durant trois mois – de M-3 à M-1 – donc à l'approche de l'objectif de course principal, mais surtout que la zone rouge est atteinte pour M-2 isolément. Ceci traduit donc le fait que certains athlètes ne respectent pas la recommandation d'augmenter leur WTL de 10 % d'une semaine à l'autre au sein d'un même cycle d'entraînement, s'exposant ainsi à un risque de surentraînement par exemple (113). Nous pensons qu'il a été intéressant d'afficher différents profils de triathlètes portant sur le WTL pour observer les disparités éventuelles. Nous avons des profils relativement linéaires tout au long de la saison tandis que d'autres vont afficher des pics ponctuels voire une augmentation majeure et prolongée du WTL dans le temps. Il serait d'ailleurs intéressant d'étudier les facteurs qui conduisent à ces différents profils de charge d'entraînement pour en connaître les déterminants.

Continuons avec la *monotony* hebdomadaire qui affichait des valeurs moyennes dans la zone recommandée entre 1 et 1,5 tout au long de la période de suivi (112), hors période post-objectif. Cependant, les écarts-types sont régulièrement en dehors de cette même zone – sans toutefois atteindre la zone critique de 2 et plus. A noter, de notre point de vue, que les mois M-2 et M-1 nous sont apparus comme optimaux dans la gestion de l'entraînement et plus particulièrement en termes de diversité adaptée de celui-ci. L'illustration de plusieurs profils nous permet de constater que l'évolution de la *monotony* chez les triathlètes que nous avons sélectionnés, se fait essentiellement sur un mode fluctuant tout au long de la période de suivi, avec des valeurs qui s'écartent très souvent de la zone optimale, alors que nous nous attendions à une certaine linéarité de ce paramètre. Ces variations pourraient s'expliquer par une inadéquation entre l'effort exigé par une ou plusieurs séances, et l'état de forme du moment, évoquant une possible erreur de gestion de la structuration de l'entraînement.

Poursuivons avec le *strain* hebdomadaire dont les valeurs moyennes siègent généralement dans la zone recommandée, hors période post-objectif. Ajoutons que les écarts-types positifs inhérents aux mois de la période de préparation à l'objectif sont en dehors de cette zone, atteignant d'ailleurs la zone à risque de surentraînement (113) pour la période M-5 – M0. Cette observation nous indique donc qu'il existe une inadéquation entre les charges d'entraînement – volume horaire et/ou intensité – et le temps de récupération, probablement insuffisant dans notre cas. Ceci est d'autant plus problématique que nous sommes proches de l'objectif sportif principal. En regardant les profils de *strain* proposés chez quelques uns de nos triathlètes, on constate d'ailleurs que quasiment tous les pics de *strain* en zone rouge interviennent avant M0, ce qui pourrait augmenter le risque de contre-performance le jour J voire même de blessures dans les dix jours qui suivent ces pics (113).

Finissons avec le *fitness* hebdomadaire, paramètre pour lequel toutes les valeurs moyennes étaient en zone rouge. Toutefois, il existe bien des écarts-types positifs sur la période de suivi hors période hivernale, ce qui nous rassurent quelque peu. Rappelons que le *fitness* est un indice de capacité de performance temporaire. Donc, s'il est négatif, cela signifie que l'athlète ne présente pas l'état de forme qu'il devrait avoir à l'approche d'une compétition. L'affichage des différents profils de *fitness* montre que certains de nos athlètes ont réussi en théorie à être en forme quand il le fallait, tandis que d'autres l'ont été trop tôt voire jamais.

Par conséquent, on constate que les recommandations en termes de WTL sont relativement bien respectées chez nos triathlètes. C'est un peu moins le cas en termes de *monotony* avec davantage d'écarts ponctuels par rapport aux valeurs conseillées. Pour le *strain*, nous avons mis en évidence chez certains athlètes des pics majeurs y compris à l'approche de la course de référence, ce qui illustre un risque pris par certains de nos sportifs, à vouloir « en faire trop » en cette période de préparation. Enfin, le *fitness* étant un indicateur de l'état de forme d'un athlète, nous avons été surpris de constater que quelques uns de nos volontaires n'étaient absolument pas en forme pour concourir le jour J. Cependant, nos conclusions sont à considérer avec attention car, rappelons-le, tous ces indicateurs sont issus d'une semaine d'entraînement choisie par le volontaire au cours d'un mois donné. Pour être plus précis, il aurait fallu étudier chaque semaine d'entraînement pour être plus formel, ce qui n'était pas l'objectif principal de ce travail.

Pour conclure ce paragraphe II dédié à l'entraînement de nos triathlètes, nous constatons que la structuration de celui-ci reste très variable d'un athlète à un autre, aussi tenté que cette structuration existe et que l'entraînement effectué ne soit pas le fait d'une « vague » que l'athlète suit en fonction de « l'humeur » du moment. A posteriori, nous pensons qu'il aurait été intéressant de compiler ensemble les résultats de ces critères composites pour produire des profils d'athlètes complets. Mais, pour être optimal, il aurait fallu faire un recueil des données d'entraînement sur toutes les semaines, et non pas sur une seule semaine par mois. Ces nouvelles données et auraient pu permettre de préciser nos premières observations. Il aurait été également intéressant de les confronter à l'existence, ou non, d'une structuration de l'entraînement organisée par un professionnel dans ce domaine. La finalité d'un tel travail complémentaire pourrait être de formuler certains messages-clés voire de mettre à disposition des triathlètes, s'entraînant seul par exemple, des outils faciles d'utilisation dans une démarche de prévention des blessures et du surentraînement (158). Nous n'avons malheureusement pas enregistré les différentes blessures qui auraient pu intervenir chez nos triathlètes au cours de la période de suivi, ni même effectué un relevé de leurs performances (ou contre-performances) durant la saison sportive. Tel n'était pas l'objectif de ce travail mais il aurait été intéressant de mettre en corrélation ces éléments avec le monitoring de l'entraînement proposé, et de vérifier ainsi leur adéquation avec la littérature disponible.

III. Remodelage cardio-vasculaire chez nos triathlètes

A. Remodelage vasculaire

1. Variabilité de la pression artérielle

Dans un premier temps, nous allons nous intéresser à l'évolution de la pression artérielle de nos volontaires, triathlètes et contrôles, au cours de notre étude. Tout d'abord, nous allons aborder les mesures de pression artérielle périphérique, c'est-à-dire évaluée au niveau du bras gauche. Au cours du temps dédié à la tonométrie d'aplanation, nous avons constaté que nos triathlètes présentaient des pressions artérielles systoliques significativement plus élevées que nos contrôles, ce qui impactaient directement la pression pulsée qui était également plus élevée. D'un point de vue longitudinal, nous avons observé dans nos deux groupes d'études des variations significatives des pressions artérielles systolique et moyenne entre V1 et V2 puis entre V2 et V3, mais pas entre V1 et V3. Ces observations ont été similaires pour la pression artérielle diastolique mais uniquement dans le groupe contrôle. Nous savons qu'il existe une variabilité de la pression artérielle à très court terme (à l'échelle d'une journée par exemple) mais également à long terme, à l'échelle d'une vie (159). Nos résultats laissent supposer qu'il existerait également une variabilité saisonnière qui n'est donc pas liée à la pratique sportive (160).

Cependant, nous avons également voulu analyser les mesures périphériques de pression artérielle, effectuées au cours de l'examen IRM. Cette fois-ci, nous avons observé une différence significative de la pression pulsée entre les triathlètes et les contrôles mais sans variation longitudinale dans chacun des deux groupes. Par ailleurs, dans le groupe contrôle, nous avons mis en évidence une variation longitudinale de la pression artérielle moyenne, avec une diminution significative entre V1 et V3 uniquement, sans que nous ayons une explication tangible pour expliquer cette observation dans les mesures où, par exemple, les volontaires contrôles n'avaient pas modifié leurs habitudes en matière d'activité physique.

Nous sommes également intéressés de la même façon aux mesures de pression artérielle centrale déterminées par le tonomètre d'aplanation SphygmoCor®. Il existait peu de différences significatives entre les triathlètes et les contrôles lors des comparaisons pour chaque visite mais, encore une fois, nous avons objectivé des variations significatives de certaines pressions artérielles, et ce dans chacun des deux groupes. Plus précisément, cette variation significative est intervenue entre V1 et V2 pour

les pressions artérielles systoliques et moyennes dans les deux groupes, mais également pour la pression artérielle diastolique dans le groupe contrôle. Nous soulevons l'hypothèse que cette variation puisse être liée à l'utilisation du tonomètre d'aplanation, qui relevait de la nouveauté pour l'ensemble des volontaires de cette étude contrairement à l'IRM, et donc d'une certaine forme de stress. Ce stress a donc pu favoriser une élévation très ponctuelle de la pression artérielle mesurée lors de la tonométrie d'aplanation à V1 uniquement (161).

Au vu de ces résultats, nous avons souhaité réaliser des comparaisons de toutes les pressions artérielles brachiales et centrales relevées, sans tenir compte des différentes visites. Nous avons donc pu mettre en évidence que toutes les pressions artérielles mesurées – systolique, diastolique, moyenne et pulsée – sont significativement différentes lors de toutes nos comparaisons deux à deux : PA brachiales en IRM versus PA brachiales en tonométrie, PA brachiales en IRM versus PA centrales, PA brachiales en tonométrie versus PA centrales. Les raisons de ces différences pourraient être expliquées par l'utilisation de deux tensiomètres à bras différents, par la position allongée en IRM alors que les volontaires étaient installés en position demi-assise en tonométrie (162), ou encore par le fait que les différentes mesures aient été réalisées à des instants différents sur deux sites géographiquement différents. Par conséquent, ces résultats posent un problème méthodologique du choix de la technique de mesure de la pression artérielle et notamment pour le calcul de la pression pulsée dans la détermination de la compliance aortique, problème que nous avons malgré tout pris en considération dans notre analyse. Peut-être devrions-nous envisager pour de futurs travaux, de réaliser la tonométrie d'aplanation de manière simultanée à l'IRM, à l'image de cette étude de Namasivayam et al. parue en 2020 (163).

2. Evaluation de la rigidité aortique

Pour déterminer la compliance aortique, nous avons mesuré les sections maximales et minimales de l'aorte thoracique ascendante mais également descendante, en IRM cardio-vasculaire grâce à des séquences bSSFP et non de contraste de phase. Suite à notre étude pilote, nous avons souhaité utiliser des mesures de pression artérielle centrale plutôt que périphérique pour calculer la compliance aortique, dans la mesure où nous nous intéressons à un gros vaisseau central : l'aorte. Mais compte tenu des différences observées entre les différentes mesures de pression artérielle, nous avons donc déterminé de deux façons les compliances et distensibilités aortiques, en utilisant les pressions pulsées centrales et périphériques.

Aucune des comparaisons intéressant la compliance aortique déterminée avec la pression pulsée centrale ne s'est révélée significative, que ce soit entre les deux groupes d'étude ou entre les différentes visites, et ce que ce soit pour l'aorte thoracique ascendante ou descendante. Cependant, nous avons observé deux différences significatives de la compliance de l'aorte thoracique ascendante calculée avec la pression pulsée périphérique mesurée dans l'IRM, entre les triathlètes et les contrôles à V2 et V3. Il n'y avait cependant pas de variation longitudinale significative de ce paramètre dans aucun des deux groupes. Aussi, nous nous sommes interrogés sur l'origine de cette variation. Dans la mesure où nous n'avons montré aucune différence significative du *strain* aortique au cours de notre étude, que ce soit entre les deux groupes ou entre les différentes visites, nous pouvons affirmer que la variation de la compliance aortique résulte de la variation de la pression artérielle périphérique et apparaît davantage comme une conséquence hémodynamique (164) plutôt qu'une modification histologique de l'aorte.

Toutefois, nous devons attirer l'attention sur le fait que nos données sont en faveur d'une élévation significative de la section aortique maximale chez nos triathlètes, tant au niveau de l'aorte thoracique ascendante que descendante. Cet élément semble être observé dans certaines études intéressant les sports d'endurance sans toutefois parler de véritable dilatation de l'aorte ascendante (93). Il est cependant difficile de comparer nos résultats à la littérature dans la mesure où elle offre surtout des références en termes de diamètre de l'aorte ascendante évalué en échographie à différents niveaux de mesure (165), alors que nos données sont exprimées en unités de surface (cm²) car issues de la CMR. Cependant, plusieurs auteurs appellent dans ces conditions à suivre ces athlètes dans la mesure où la dilatation de l'aorte ascendante au-delà de 38-40 mm de diamètre ne doit pas être considérée comme un processus physiologique (99) que l'on aurait pu qualifier d'artère d'athlète.

Enfin, nous souhaitons mentionner que malgré toute l'attention que nous avons portée à la bonne acquisition de nos séquences IRM, il s'est avéré que certaines coupes étaient artéfactées au niveau de l'aorte, rendant certaines mesures de qualité moindre. Par conséquent, nos résultats et leur interprétation pourraient en être impactés.

Continuons avec les mesures de VOP réalisées en tonométrie d'aplanation, et notamment avec le SphygmoCor®. Nous avons constaté que la vitesse de l'onde de pouls était significativement plus basse chez nos triathlètes pour les deux dernières visites, impliquant donc que leur rigidité artérielle aurait diminué comparativement à nos contrôles, ce qui est en adéquation avec la littérature (166). Nous souhaitons d'ailleurs ajouter que, considérant que la VOP est un marqueur de rigidité artérielle centrale (167–169), nous pouvons donc affirmer que cette dernière est bien diminuée chez nos triathlètes. De plus, l'analyse longitudinale nous a montré que cette variation intervenait de manière significative entre V1 et V2 uniquement. Ce constat laisserait supposer qu'il existerait également une variabilité saisonnière de la VOP. Or Ma et al. ont mis en évidence une relation linéaire entre la VOP et la pression artérielle dans cette étude de 2018 (170). Par conséquent, cette variation de la VOP pourrait être liée à une variation de la pression artérielle. Mais comme cette variation de pression artérielle est également retrouvée entre V2 et V3 chez nos triathlètes mais aussi chez nos contrôles, il se pourrait finalement que l'augmentation de l'entraînement ait contribué à la diminution de la VOP entre V1 et V2 chez nos triathlètes (171).

Pour finir, nous avons inclus dans notre protocole IRM une séquence pour mesurer la VOP entre l'aorte thoracique ascendante et l'aorte abdominale. Nous aurions aimé valider notre outil IRM pour les mesures de VOP en s'appuyant sur les résultats de la tonométrie d'aplanation, *gold standard* en la matière. Malheureusement, la détermination de ce paramètre en IRM n'est pas encore de reproductibilité adéquate pour répondre à cette demande.

3. Impact au niveau du réseau artériel périphérique

Dans notre étude, nous nous sommes intéressés initialement à la compliance de l'aorte proximale et à sa variation liée à la pratique sportive. Cependant, nous avons souhaité étendre notre réflexion au réseau artériel périphérique. Nous avons observé une augmentation significative de la compliance artérielle totale (TAC) chez nos triathlètes sans variation saisonnière dans aucun des deux groupes. On pourrait donc penser à la lecture de ce résultat que nos triathlètes, grâce à leur activité sportive, ont diminué la rigidité globale de leur réseau artériel. Or la TAC étant issue du ratio entre le *stroke volume* et la pression pulsée périphérique mesurée dans l'IRM, son augmentation s'expliquerait donc par une élévation du *stroke volume* dans la mesure où la pression pulsée est restée stable au cours de notre étude. Il n'y a donc pas de lien direct avec la rigidité globale des artères de nos triathlètes. En effet, et d'après cette étude de Papaioannou et al., la TAC est davantage reliée à la masse du ventricule gauche, qu'à la vitesse de l'onde de pouls (172). Autrement dit, la TAC est davantage un marqueur d'efficacité du cœur gauche, que de la rigidité du réseau artériel, marqueur qui pourrait donc plutôt s'inscrire dans la quantification du couplage ventriculo-aortique.

Nous nous sommes également intéressés à un second marqueur caractérisant le réseau artériel périphérique : la résistance vasculaire périphérique totale (TPVR). Toutefois, nous n'avons objectivé aucune différence entre nos triathlètes et nos contrôles, y compris au cours de la saison sportive, ce qui nous a interpellé. Etant donné que l'exercice physique contribue à la dilatation raisonnée des artères et donc à une diminution des résistances vasculaires périphériques (173), nous pensions que la TPVR serait diminuée chez nos triathlètes. Cependant, cet abaissement des résistances périphériques lié à l'exercice physique ne persiste que peu de temps après l'effort, avant une restauration aux valeurs basales en quelques heures à peine (174). Par conséquent, cette diminution de la TPVR chez nos athlètes serait assez labile et surtout serait donc objectivable non pas au repos mais en per- et post-effort immédiat.

En conclusion de ce paragraphe dédié au remodelage vasculaire, nous avons montré que la variation de la compliance artérielle, et directement de la rigidité artérielle, résultait essentiellement de la variation de la pression artérielle au cours de la saison sportive, et plus précisément de la pression pulsée (164). Nous nous attendions à des différences significatives plus nombreuses entre nos triathlètes et nos contrôles lors des comparaisons que nous avons effectuées,

intéressant tant l'aorte thoracique ascendante que l'aorte thoracique descendante, à l'image de cette étude récente de Tarumi et al. (175). Cependant, nous avons pu montrer que les calculs de la compliance aortique étaient facilement impactés par certains biais méthodologiques, tant au niveau des mesures de la pression artérielle que des mesures des sections aortiques en IRM. Néanmoins, nous avons objectivé des augmentations significatives au moins des sections aortiques maximales au niveau de l'aorte ascendante chez nos triathlètes, soulevant l'hypothèse d'un possible prémisses de dilatation anévrysmale au long cours chez des athlètes d'endurance (97). Ces différents aspects évoqués viennent donc renforcer l'idée, au même titre que celle du cœur d'athlète, de l'existence d'une artère d'athlète, déjà évoquée par Green et al. en 2012 (103). Mais il serait probablement utile de s'intéresser, dans ce contexte, à ce qui se passe au niveau artériel périphérique également.

B. Remodelage cardiaque

1. Variations anatomiques et cavitaires du cœur

Dans l'étude des différents volumes cardiaques, fractions d'éjection et masse du ventricule gauche, nous avons pu mettre en évidence une augmentation significative des volumes télésystolique et télédiastolique lors des trois visites chez nos triathlètes. Cette élévation s'est également accompagnée d'une augmentation de la FEVG et de la masse du ventricule gauche, toujours chez les triathlètes. Des observations relativement similaires ont été faites du côté du cœur droit. Ces adaptations cardiaques sont donc en faveur de l'existence d'un cœur d'athlète chez nos volontaires sportifs (176). Nous aurions souhaité pouvoir nous positionner quant au type de remodelage qu'ils présentent : excentrique ou mixte ? Car la question n'est pas aussi bien tranchée pour des sportifs comme les triathlètes qui présenteraient un remodelage « entre » les deux entités ancestrales à l'image des cyclistes, qui combinerait élargissement du ventricule gauche et augmentation de la masse de ce dernier. Cette hypothèse peut s'entendre au vu de notre étude de l'entraînement de nos triathlètes, qui montre d'une façon globale qu'au moins la moitié du temps d'entraînement est dédié à la pratique du vélo. Dans ce cas, nous aurions aimé pouvoir comparer nos

résultats avec d'autres études références, or la littérature n'est que très peu fournie lorsqu'on s'intéresse au remodelage cardiaque mixte. A en voir cette méta-analyse récente de D'Ascenzi et al. (176), nous regrettons que les données présentées pour le remodelage mixte ne soient pas toutes indexées sur la surface corporelle, ce qui aurait permis de les comparer avec celles de volontaires n'ayant pas forcément la même taille. De plus, nous avons constaté que nos données ne sont pas forcément en adéquation avec les valeurs présentées dans cette étude au titre d'un remodelage cardiaque pour les sports d'endurance. Nous sommes interrogatifs quant aux valeurs de la masse indexée du VG que nous avons mesurées tant chez nos triathlètes (entre 58 et 69 g/m² en fonction des visites) que chez nos contrôles (entre 26 et 32 g/m²), et que nous trouvons anormalement basses (176,177) mais similaires tout au long de notre étude. Nos contrôles ont également des volumes d'éjection systolique indexés aussi élevés que ceux des athlètes d'endurance de cette revue de la littérature. De ce fait, nous évoquons favorablement un biais de mesure lors du post-traitement des données IRM.

De plus, la stabilité de l'ensemble des volumes et masse mesurés au cours de notre étude indique que le remodelage cardiaque identifié chez nos triathlètes serait probablement le fait d'une cinétique lente, acquis année après année. Or d'après cette étude de Dawkins et al. parue en 2020, un entraînement progressif de six mois pour un triathlon longue distance à raison de 13 heures d'entraînement hebdomadaire, est suffisant pour induire un remodelage cardiaque débutant de type cœur d'athlète chez des individus préalablement actifs mais non-entraînés (178). Par conséquent, ce remodelage apparaît dès lors d'un entraînement suffisant, régulier et prolongé dans le temps – d'après Carré, plus de six heures hebdomadaires avec essoufflement marqué et depuis au moins six mois (179) – et va évoluer jusqu'à un certain seuil avant de se stabiliser. Tant que le muscle cardiaque est suffisamment soumis à ce stress, ce remodelage va persister dans le temps. On parlera de remodelage cardiaque inverse lorsque que ces adaptations morphologiques et fonctionnelles auront suffisamment régressé pour retrouver des valeurs communes à des personnes non-entraînées (180). Cette cinétique est fonction du temps mais également de la charge d'entraînement résiduelle : un arrêt complet de l'entraînement accélèrera ce remodelage inverse, qui peut nécessiter entre trois et six mois d'arrêt complet du sport pour retrouver un cœur indemne de remodelage, en l'absence de pathologie sous-jacente (179). Par conséquent, les modalités de notre protocole ne prévoyaient pas cette demande envers nos triathlètes dans l'espoir de mettre en évidence ne serait-ce qu'un début de remodelage cardiaque inverse.

Parallèlement à cette étude anatomo-fonctionnelle du muscle cardiaque, nous avons couplé nos mesures à celles du T1 déterminé en IRM dans le but d'objectiver des modifications tissulaires liées à la pratique sportive, tant au sein du muscle cardiaque qu'au sein de muscles squelettiques. Quelques variations significatives ont été mises en évidence entre le groupe Tri et le groupe Ctrl sans toutefois que les valeurs du T1 ne soient considérées comme pathologiques. Seul le T1 du sang ventriculaire a montré une variation longitudinale significative chez nos triathlètes et notamment une augmentation entre V1 et V2. Ce constat pourrait être lié à des variations de la composition sanguine en termes d'hématocrite ou de ferrémie par exemple, dues à la pratique sportive (181).

2. Adaptation du travail cardiaque

Nous avons vu précédemment que le cœur, sous l'influence d'un entraînement sportif suffisant et régulier, allait se transformer anatomiquement et fonctionnellement. D'une façon très générale, les différents volumes ventriculaires vont augmenter, ce qui va impacter les paramètres du travail cardiaque, tels que le *stroke work* et l'index cardiaque. Le premier, qui correspond à une estimation de la fonction ventriculaire, est augmenté significativement chez nos triathlètes comparativement à nos contrôles. Chez ces derniers, aucune variation longitudinale n'a été observée tandis que la *p-value* dans le groupe Tri était à la limite de la significativité ($p = 0,052$). Le *stroke work* résultant du produit du *stroke volume* par la PAM, il se pourrait donc que sa variation saisonnière soit davantage la conséquence des variations saisonnières de la pression artérielle moyenne dans le groupe Tri ($p = 0,095$) alors que le *stroke volume* est resté relativement stable tout au long de la saison sportive dans les deux groupes. Nous rappelons que le *stroke volume* était cependant significativement plus élevé chez les triathlètes, tandis que l'index cardiaque était plus bas et ce, sans variation longitudinale de ce dernier paramètre.

Nous avons également observé une diminution de la fréquence cardiaque de repos dans le groupe Tri comparativement au groupe Ctrl. Cette adaptation est le fruit d'une augmentation du tonus vagal médié par le système nerveux autonome parasympathique, qui résulte de l'entraînement (182). Nous avons observé une variation statistiquement significative de la FC chez nos triathlètes durant la saison sportive, sans pour autant mettre en évidence à quel moment de l'année aurait pu intervenir

cette variation. Nous émettons donc l'hypothèse que l'intensification de l'entraînement due à une augmentation de la pratique dédiée au vélo aurait pu diminuer davantage leur FC entre V1 et V2 d'après cette étude de Leicht et al. (182).

Par conséquent, un être humain, qu'il soit entraîné ou non, a toujours besoin du même débit cardiaque pour assurer sa demande basale en oxygène, ce que nous avons observé dans notre population d'étude globale. En effet, nous n'avons remarqué aucune différence significative des débits aortiques exprimés en L/min entre les triathlètes et les contrôles, ni variation longitudinale significative tout au long de la période d'étude. Chez nos athlètes, deux paramètres cardiaques se sont donc adaptés en conséquence pour assurer ce même débit : la fréquence cardiaque et le volume d'éjection systolique, la diminution de la FC imposant une élévation du VES. Ces adaptations se confirment également par l'étude des débits aortiques exprimés en mL/batt qui étaient augmentés de manière significative chez nos triathlètes. Le sport a donc un effet chronotrope négatif et inotrope positif sur le muscle cardiaque, ce qui a pour conséquence une amélioration globale de la pompe cardiaque, au moins au repos dans notre étude (183).

En conclusion de ce paragraphe dédié au remodelage cardiaque, nous avons pu mettre en évidence l'existence d'un remodelage cardiaque de type cœur d'athlète chez nos triathlètes. Notre étude nous a permis de supposer que ce remodelage apparaît de façon progressive jusqu'à un certain seuil, à partir duquel il restera stable dans le temps, notamment au cours de la saison sportive. Nous aurions aimé mettre également en évidence un début de remodelage cardiaque inverse chez nos triathlètes mais la diminution de leur entraînement n'a ni été suffisante ni été assez prolongée dans le temps pour observer de tels effets. En parallèle, ces modifications anatomiques du muscle cardiaque observables en CMR et liées à la pratique du sport, s'accompagnent d'adaptations fonctionnelles, plus difficilement observables au repos. En effet, ce remodelage cardiaque a pour but in fine d'améliorer la performance cardiaque à l'effort, de manière à répondre de façon adéquate à la demande métabolique exigée par l'exercice (184).

C. Couplage ventriculo-aortique

Au cours de notre étude, nous avons pu mettre en évidence des adaptations fonctionnelles de la pompe cardiaque via une amélioration du travail cardiaque chez nos triathlètes. Ces modifications que nous avons observées ont pour but d'optimiser plus tard le travail cardiaque à l'exercice et donc d'assurer la demande métabolique nécessaire et suffisante à l'effort demandé. D'autres éléments pourraient compléter ces adaptations du ventricule gauche chez l'athlète, comme un raccourcissement de la systole ou encore une augmentation de la vitesse de vidange ventriculaire, mais sont davantage accessibles en échocardiographie (185). On parle alors d'amélioration de l'élastance ventriculaire, qui était d'ailleurs significativement plus basse chez nos athlètes et sans variation longitudinale.

Or, pour permettre cette efficacité de la pompe cardiaque en toutes circonstances, le couplage ventriculo-aortique doit s'adapter, ce qui implique que l'élastance artérielle s'adapte elle aussi. Nous avons d'ailleurs pu souligner dans nos résultats une diminution significative de l'élastance artérielle chez nos triathlètes par rapport aux contrôles, sans variation longitudinale à nouveau. Walley rappelle d'ailleurs que, pour que l'élastance ventriculaire soit efficace sur le plan énergétique au moment de l'éjection systolique, il faut que l'élastance aortique soit adéquate (186). Une élastance ventriculaire supérieure à l'élastance artérielle entraînerait une chute de pression du VG vers l'aorte, et donc une perte d'énergie (187) ; mais si l'élastance ventriculaire est inférieure à l'élastance artérielle, alors l'énergie serait cette fois-ci perdue sous forme de travail mécanique potentiel (186). Chez une personne indemne de pathologie cardio-vasculaire, les deux élastances sont relativement similaires et évoluent selon une boucle pression-volume. Leur dynamique adéquate au cours d'un cycle cardiaque permet donc d'optimiser le travail cardiaque dont le but est, rappelons-le, de transférer le sang du ventricule gauche vers l'aorte, pour sa redistribution vers le réseau artériel périphérique au cours de la diastole.

Nous pouvons toutefois nous interroger sur la cinétique avec laquelle ces remodelages ont été mis en place l'un par rapport à l'autre. Nous pensons qu'au vu de nos résultats, les triathlètes présentent un remodelage cardiaque ancien. Quant aux chiffres de VOP ou encore de compliance, nous pourrions croire que le remodelage vasculaire est plutôt le fruit d'adaptations récentes. Or d'après Kasikcioglu et al., une augmentation de la distensibilité aortique chez des athlètes entraînés en endurance peut contribuer à une amélioration de leur fonction diastolique, qui peut être considérée comme un facteur d'adaptation cardiovasculaire physiologique (188). De la même façon, Florescu et

al. considèrent que les athlètes d'endurance présentent une fonction cardiaque « supra-normale » due à une meilleure fonction endothéliale et artérielle (77). Ces athlètes présentent donc un meilleur couplage ventriculo-artériel, ce que les auteurs confirment par leurs mesures (77). De notre côté, nos triathlètes présentaient un couplage ventriculo-artériel abaissé par rapport aux volontaires du groupe contrôle et ce, sans variation au cours de l'étude. Ces observations marquent donc une optimisation du couplage ventriculo-aortique au repos chez nos athlètes, de manière à pouvoir répondre à une augmentation de la demande métabolique et en oxygène à l'effort soutenu (186). Par conséquent, il semblerait que les adaptations fonctionnelles cardiaques seraient finalement fonction des adaptations vasculaires liées à l'exercice, et non l'inverse. Aussi, pour mettre en évidence cette cinétique entre ces deux remodelages vasculaire et cardiaque, il serait intéressant de suivre de manière longitudinale avec des mesures répétées – non invasives – des élastances ventriculaire et artérielle, des individus en bonne santé, non entraînés voire même sédentaires, qui s'engageraient dans un sport d'endurance.

Enfin, comme nous l'avons évoqué, la physiologie cardio-vasculaire d'un athlète entraîné se révèle être particulièrement intéressante à l'effort. Malheureusement, nos explorations se sont limitées à l'état de repos de nos triathlètes, aussi nous n'avons pas pu obtenir de données du couplage ventriculo-aortique durant l'exercice ou en post-exercice immédiat. Il aurait été intéressant par exemple, comme le mentionne Anasoï et al. dans cet article de 1990, d'observer tout d'abord une diminution de l'élastance artérielle puis une diminution de l'élastance ventriculaire au fur et à mesure que l'intensité de l'effort augmente et se rapproche du seuil anaérobie (76). Fahs et al. se sont également intéressés au couplage ventriculo-aortique à l'effort et en post-exercice immédiat, et ont pu montrer chez des athlètes d'endurance que ces modifications d'élastance, au moins artérielle, persistaient après 60 minutes d'effort (189). De plus, elles étaient également fonction de l'intensité de l'effort. Une fois encore, ces travaux montrent à quel point l'intensité d'un effort – que ce soit à l'entraînement ou en compétition – impacte le système cardio-vasculaire dans son ensemble dont le couplage ventriculo-aortique. Enfin, et dans le même ordre d'idée, Cote et al. ont pu démontrer que, dans les suites d'un effort à haute intensité, rigidité artérielle et mécanismes de torsion cardiaque sont intimement liés. Ils mettent en lumière également l'importance de l'intégrité de l'aorte pour répondre de manière adéquate à une diminution de la contraction cardiaque chez les volontaires de sexe masculin uniquement, induite par l'exercice à haute intensité (190). En conséquence, nous pensons qu'il est nécessaire de poursuivre ces recherches en matière de physiologie cardio-vasculaire de l'effort et notamment de l'effort de longue durée. En effet, de plus en plus d'études mettent en évidence des marqueurs de souffrance myocardique en post-effort immédiat et de résolution rapide (moins de 24 h en général) à l'issue de telles courses, que ce soit chez les adultes

(191) ou chez les enfants/adolescents (192). Il nous paraîtrait d'ailleurs intéressant de développer l'utilisation de l'imagerie IRM de flux 4D dans cette perspective, y compris dans l'exploration du couplage ventriculo-aortique, l'IRM permettant la double analyse combinée et reproductible, anatomie/fonction et cœur/gros vaisseaux en un même temps d'examen.

Partie 5 : Conclusions & Perspectives

Au cours de ces travaux de thèse, nous avons souhaité vérifier l'hypothèse formulée à l'issue de nos travaux de recherche de Master 2 tenus en 2014 : la compliance de l'aorte proximale aurait diminué chez les individus entraînés en endurance, en l'occurrence des triathlètes, du fait de l'intensification de l'entraînement (1). L'objectif principal de l'étude COATRI était donc d'étudier la variation de la compliance de l'aorte thoracique ascendante au cours de la saison sportive chez des triathlètes amateurs longue distance. De la même façon, nous avons voulu rechercher une variation du remodelage cardiaque. Pour cela, nous avons fait appel à une modalité d'imagerie qui permet d'associer au cours d'un même temps d'examen, l'étude du muscle cardiaque à celle de l'aorte mais également de combiner l'étude anatomique avec l'étude fonctionnelle de ces structures : l'IRM cardio-vasculaire. Dans ce contexte, la reproductibilité non opérateur-dépendante de ses mesures (147) en fait sa supériorité par rapport à l'échocardiographie. En parallèle, et ce afin d'améliorer la nature de nos résultats et d'optimiser leur interprétation, nous avons ajouté à nos explorations IRM un temps d'examen dédié à des mesures de pression artérielle centrale et de vitesse de l'onde de pouls en utilisant un tonomètre d'aplanation, gold standard pour ce type d'évaluation non invasive (193). La réalisation de l'ensemble de ces explorations chez tous nos volontaires et au cours de trois temps répartis à des moments stratégiques de la saison sportive, permettrait d'identifier une variation de chaque paramètre étudié au cours de la période de suivi.

Nos résultats nous ont permis d'observer une diminution de la rigidité artérielle chez nos athlètes entraînés en endurance, ce qui est cohérent avec la littérature (96). Cependant, ces affirmations sont plus ou moins significatives en fonction du niveau d'analyse transversal ou longitudinal, et de la méthodologie utilisée. En effet, les résultats de l'analyse de la VOP mesurée par le tonomètre d'aplanation SphygmoCor® sont en faveur d'une variation longitudinale de la rigidité artérielle chez les triathlètes, ce que ne confirme pas l'analyse de la compliance aortique. De la même façon, l'analyse de la compliance aortique calculée à partir de la pression pulsée centrale ne montre aucune différence entre nos deux populations, alors que cette différence existe avec l'analyse de la compliance aortique calculée à partir de la pression pulsée périphérique. Nous

pensons qu'il serait donc nécessaire dans un premier temps de poursuivre les explorations méthodologiques intéressant l'évaluation de la rigidité artérielle centrale selon d'autres modalités que la tonométrie d'aplanation, comme l'IRM cardio-vasculaire. Le choix de la pression pulsée – centrale ou périphérique – dans le calcul de la compliance en fait d'ailleurs partie au vu de cette étude de Bulas et al. (164). Dans un second temps, les investigations visant à étudier la cinétique de la rigidité artérielle de l'athlète d'endurance au cours de la saison sportive pourraient reprendre.

Néanmoins, l'étude des sections aortiques nous a permis de confirmer quelque peu ce que nous suspicions lors de nos travaux de 2014 et déjà rapporté par certaines études chez des athlètes d'endurance au long cours (97,194) : un élargissement de l'aorte thoracique chez nos triathlètes et ce, sans variation saisonnière. Cependant, nous ne sommes pas en mesure de confirmer l'origine de cette adaptation. La première hypothèse pourrait être en faveur d'une augmentation de la pression pariétale sur l'aorte donc liée à la volémie et au système nerveux autonome. Pour cela, nous avons envisager d'utiliser nos séquences de flux 4D et d'analyser les données du *wall shear stress*. Cependant, nous avons préféré ne pas nous investir outre mesure pour ce critère d'évaluation secondaire non prioritaire. La seconde hypothèse pourrait relever d'une modification des propriétés histologiques de la paroi aortique. Nous aurions aimé pouvoir répondre à cette question en utilisant des séquences de *mapping T1* au niveau de l'aorte mais la finesse de sa paroi couplée à la résolution spatiale limitée de l'IRM ne nous ont pas permis d'aboutir. Nous pensons toutefois que les innovations technologiques dont bénéficie l'IRM cardio-vasculaire telles que la flux 4D ou encore les méthodes de caractérisation tissulaire avancées, permettront de caractériser dans les années à venir les variations structurelles des gros vaisseaux centraux de manière non invasive. En attendant, nous soulevons la nécessité de poursuivre les travaux s'intéressant à l'élargissement de l'aorte ascendante étudié en IRM dans les populations sportives. A l'heure actuelle, certaines études proposent des valeurs de référence en fonction de la population étudiée (91,92) mais elles font généralement appel à l'échocardiographie et à sa mesure du diamètre de l'aorte, et non de sa surface. Un suivi longitudinal en IRM d'un individu à risque augmenterait la qualité des évaluations mais, couplées à des séquences en *4D Flow*, permettrait d'ajouter une dimension fonctionnelle intéressante voire utile dans la prise en charge diagnostique et même thérapeutique de ces individus. Toutefois, il est utile de rappeler que d'après D'Andrea et al., la dilatation vraie de l'aorte ascendante chez des athlètes reste rare et ne relève pas de la physiologie (93). L'angioscanner reste l'examen de choix dans le suivi de véritables anévrismes de l'aorte ascendante tandis que l'échocardiographie transthoracique doit rester préférée comme l'examen de référence dans une démarche de *screening* régulier, y compris précocement dans certaines populations à risque (98).

A la vue de ces éléments, nous pouvons formuler l'hypothèse qu'il existerait également une artère d'athlète, au moins chez les athlètes entraînés en endurance, comme l'évoquait déjà Green et al. en 2012 (103). De notre point de vue, il serait intéressant d'en explorer deux aspects. Le premier serait d'évaluer la cinétique avec laquelle ces adaptations se mettent en place et pour quel type d'entraînement dans sa globalité, comme à la manière de Carré qui évoque une quantification minimale de l'entraînement pouvant induire un remodelage de type cœur d'athlète (179). Dans cette revue de la littérature dédiée aux adaptations vasculaires liées à l'exercice et parue en 2017, Green et al. tracent les grandes lignes de cette cinétique et évoquent déjà la possibilité d'un phénomène inverse en l'absence de toute stimulation suffisante (195), de la même manière encore une fois que le remodelage cardiaque inverse lié au désentraînement. Le second aspect serait de s'intéresser davantage non seulement aux adaptations fonctionnelles de cette artère entraînée (196) mais également aux adaptations anatomiques induites par l'exercice (197). Il est vrai que le réseau artériel est vaste et complexe si l'on s'en réfère aussi au réseau périphérique, et que l'artère peut être de petite taille. Mais nous devons garder à l'esprit que, à l'image de certaines pathologies induites par un remodelage cardiaque excessif comme dans le cas des cardiopathies dilatées ou arythmogènes, il serait peu probable que l'artère d'athlète soit indemne à son tour d'issues pathologiques. La littérature le confirme d'ailleurs avec par exemple cette étude de Rouvière et al. qui aborde la problématique de l'endofibrose iliaque chez des athlètes d'endurance (198), ou encore cette étude de Menon et al. qui s'intéressent aux différentes pathologies artérielles issues de traumatismes répétés chez l'athlète (199).

Nous constatons donc que de nombreux arguments convergent vers l'existence, en parallèle du cœur d'athlète, d'une artère d'athlète. Au vu des enjeux physiopathologiques de ce remodelage vasculaire dans le champ actuel du sport, il apparaît donc de plus en plus nécessaire de développer les axes de recherche autour de ce concept relativement nouveau, à l'image de Green ou de Thijssen et de leurs collaborateurs, qui viennent de publier plusieurs études relatives aux adaptations artérielles chez le sportif (200,201).

Sur le plan cardiaque, nous avons pu mettre en évidence des éléments en faveur du cœur d'athlète chez nos volontaires sportifs. Nous avons malheureusement été limités sur le plan méthodologique pour aller plus loin dans la caractérisation de ces adaptations. En effet, nous aurions aimé pouvoir nous positionner en faveur d'un des trois remodelages que nous connaissons : concentrique, excentrique ou mixte, même si nous pouvons d'ores et déjà exclure le concentrique qui est l'apanage des athlètes de force (202). Par ailleurs, nous avons pu montrer que le remodelage

cardiaque de nos triathlètes est resté stable durant la saison sportive. Mais nous pensons qu'il serait intéressant d'avoir davantage de données concernant la cinétique de ce phénomène adaptatif chez un athlète et ce, sur une évaluation de plusieurs années. Ce suivi longitudinal permettrait d'évaluer jusque dans quelles mesures ce remodelage augmente jusqu'à un certain niveau de stabilité (203), voire dans quelles mesures il varie en fonction du volume d'entraînement, de son intensité et de son antériorité (176). En effet, il n'est pas exclu par exemple que, chez un athlète d'endurance à haut volume d'entraînement cumulé sur une vie, la dilatation de ses cavités gauches continue d'évoluer au cours du temps pour atteindre un niveau de non-retour à un âge avancé (204). Par conséquent, l'étude des modifications de charge hémodynamique au sein du ventricule pourrait aider à la compréhension de ces mécanismes (205), en faisant appel à l'imagerie IRM de flux 4D par exemple. Dans ce contexte, nous pensons que le dépistage et le suivi adapté par la communauté des médecins et des cardiologues du sport a un rôle fondamental à jouer dans la prévention de ces situations délétères, en limitant voire en contre-indiquant de manière raisonnée la pratique sportive à un moment décisif dans la vie d'un sportif assidu (206,207).

En parallèle et davantage sur le plan fonctionnel, nous avons pu mettre en évidence que l'entraînement a un effet chronotrope négatif mais également un effet inotrope positif sur le cœur. Ces adaptations traduisent une optimisation de la contraction cardiaque et donc de l'éjection systolique à chaque battement chez ces athlètes (185). On parlera donc d'amélioration de l'efficacité cardiaque et même plus précisément d'amélioration de l'élastance ventriculaire (186), ce que nous avons confirmé par nos résultats. Nous avons pu constater dans notre étude que cette dernière adaptation était probablement le fruit de très nombreuses heures passées à s'entraîner et qu'elle ne variait pas au cours de la saison sportive. De façon concomitante et grâce à nos manipulations, nous avons pu dégager des chiffres d'élastance artérielle, elle aussi favorablement optimisée chez nos triathlètes. Par conséquent, nous avons pu produire des chiffres du couplage ventriculo-aortique au repos tant chez nos athlètes que chez nos contrôles, ce qui est satisfaisant dans la mesure où peu de data sont disponibles sur ce sujet. Pour compléter nos données, il serait intéressant de tester la même population de volontaires en conditions d'exercice et d'en tirer des chiffres du couplage ventriculo-aortique à l'effort mais également en post-effort immédiat. En effet, tout le potentiel d'un cœur d'athlète et de son couplage ventriculo-aortique s'exprime davantage à l'exercice qu'au repos (189). De cette façon, il serait également envisageable d'identifier des arguments supplémentaires qui viendraient renforcer l'existence d'une artère d'athlète (143).

Pour finir, nous sommes convaincus que l'entraînement dans sa définition très large, a un rôle à jouer dans le remodelage cardio-vasculaire. Nous aurions aimé pouvoir mettre en relation les données issues de l'entraînement de nos triathlètes avec celles issues des explorations cardio-vasculaires que nous avons menées. Malheureusement, nous avons fait face à un problème de temporalité dans le recueil de nos data, que nous n'avons pas pu solutionner avant de boucler ce manuscrit. En effet, nous avons des données d'entraînement ponctuelles rapportées à l'échelle mensuelle lorsque nos paramètres cardio-vasculaires reflétaient une évaluation à un temps donné d'un remodelage cardio-vasculaire évoluant depuis plusieurs années. Néanmoins, nous projetons d'étudier la dérivée de nos paramètres d'entraînement au cours du temps dans l'espoir de proposer prochainement un modèle d'analyse multivariée. Ce dernier pourrait peut-être expliquer certains paramètres du remodelage cardio-vasculaire en fonction de paramètres de l'entraînement, tant récents qu'anciens. Toutefois, cette analyse de l'entraînement de nos triathlètes nous aura permis de constater qu'il serait nécessaire de développer des outils de suivi de l'entraînement faciles à utiliser pour tout sportif. Ce projet pourrait s'inscrire dans une démarche de prévention du syndrome de surentraînement et de blessures, à l'heure où certains athlètes semblent vouloir « trop en faire » lors de la phase de préparation précédant un triathlon longue distance.

Annexes

Annexe n°1 – Courrier d'information à destination des triathlètes de la Ligue Lorraine de triathlon



contact@triathlonlorraine.com | 03 83 18 87 97
Maison Régionale des Sports – 13 rue Jean Moulin – BP 70001 – 54510 TOMBLAINE

A l'attention des Président-e-s des clubs,
Des Triathlètes,

Objet : Projet de Recherche Médicale

Tomblaine,
le 11 août 2020

Madame, Monsieur,

Dans le cadre de ma thèse de sciences, je poursuis actuellement mes travaux de recherche en IRM sur le remodelage cardiaque et vasculaire lié à la pratique du triathlon longue distance.

Nous allons bientôt relancer les acquisitions IRM et avons besoin de volontaires pour réaliser plusieurs IRM cardio-vasculaires sans injection de produit de contraste au cours de l'année 2018. Nous avons besoin de sportifs mais également de non-sportifs pour comparer les différentes mesures entre les deux populations.

Je fais donc appel à des triathlètes masculins de catégorie sénior (18 à 39 ans) en 2018, répondant entre autres aux critères suivants :

- Avoir un IMC compris entre 18,5 et 25 kg/m²
- Avoir pour objectif en 2018, de prendre part à un triathlon longue distance, c'est-à-dire au moins distance L
- Avoir un niveau de performance minimum : finir un triathlon M en 2017 entre 2h et 2h45
- Avoir un volume d'entraînement défini :
 - En-dessous de 8h par semaine en période hivernale
 - Entre 10h et 15 heures (voire plus) par semaine en pleine préparation de l'objectif principal

Nous allons faire appel également à des hommes de même âge, qui ne pratiquent aucune activité physique régulière ou de façon très limitée (moins de 150 min de jogging par semaine par exemple), et qui présentent un IMC compris entre 18,5 et 25 kg/m².

Si vous vous êtes reconnu en l'un de ces deux profils, je vous invite à me contacter dès à présent par mail à annechedupont@gmail.com en m'indiquant vos coordonnées pour que je puisse vous rappeler.

Ou si vous connaissez quelqu'un qui pourrait se porter volontaire pour cette mission, merci de lui transmettre ce message.

Je reste bien entendu à votre disposition pour toute information complémentaire dont vous auriez besoin et vous remercie par avance pour l'intérêt que vous porterez à cette sollicitation.

Bien cordialement,

Anne-Charlotte DUPONT
Commission Régionale Médicale

Envie de différence ? Vibrez Triathlon !

Annexe n°2 – Article de presse dans le cadre du recrutement de volontaires sains

Le cœur des triathlètes aux petits soins

Généraliste et médecin du sport, le Dr Anne-Charlotte Dupont prépare, parallèlement à son activité, une thèse de sciences à l'Université de Lorraine « dans le but de devenir enseignant-chercheur en médecine de l'exercice et du sport ». Elle mène actuellement des travaux de recherche « sur le remodelage du cœur et des vaisseaux » chez des triathlètes longue distance au cours de leur saison sportive : « J'étudie les adaptations anatomiques ou fonctionnelles du cœur et de l'aorte liées à cette pratique sportive », explique-t-elle, par rapport à un groupe témoin.

Un appel à volontaires

Pour constituer ce groupe témoin, le médecin lance un appel à volontaires : des hommes nés en 1978 (mais n'ayant pas encore 40 ans) et en 1982, ne pratiquant pas ou peu de sport, n'étant pas en surpoids et ne présentant pas de pathologies cardiovasculaires.

L'objectif est « de comparer leurs paramètres cardiaques et vasculaires avec ceux des triathlètes » en-



Le Dr Anne-Charlotte Dupont est médecin généraliste et médecin du sport. Elle est aussi l'un des médecins de la Ligue Grand Est de triathlon. Photo DR

trés dans le protocole de recherche. Un protocole qui consiste à répondre à trois visites de 2 à 2 h 30 au CHRU de Nancy (site de Brabois), étalées sur 10 mois, avec à chaque fois réalisation d'une IRM (sans injection de produit de contraste) et mesures de rigidité artérielle.

Ces examens ne nécessitent

« aucun geste invasif », rassure le Dr Dupont.

En alternant les périodes d'entraînement et de repos sur plusieurs années, les triathlètes longue distance risquent-ils des déviations pathologiques au niveau de l'aorte ? Si le but ultime de ce projet est à long terme de mettre en place « un potentiel plan de prévention », il vise en premier lieu à « contribuer à connaître davantage la physiologie cardiovasculaire de l'ultra-endurant », explique le Dr Dupont. Et sur le plan technique, « de démontrer que l'IRM peut être un bon moyen pour réaliser de façon indépendante des mesures de rigidité artérielle ».

Le triathlon est une discipline que connaît bien la jeune femme pour le pratiquer. Le Dr Anne-Charlotte Dupont est également l'un des médecins de la Ligue Grand Est de triathlon.

M.H.V.

► Contact : 03.83.15.78.23 ou (53.17) ou par mail cic-it-nancy@chru-nancy.fr

Annexe n°3 – Poster de Camille HUYNH, présenté lors du 12^e congrès commun SFMES-SFTS en 2019



Etude comparative de la pratique sportive débutée dans l'enfance d'une population de triathlètes adultes amateurs longue distance par rapport à sa population témoin appariée



C. Huynh¹, A. Cherifi², L. Joly^{3,4}, G. Hossu², M. Pousset^{5,6}, D. Mandry^{1,7}, A.C. Dupont¹

- ¹ Université de Lorraine, INSERM, IADI U1254 – Imagerie Adaptative Diagnostique et Interventionnelle, Nancy
- ² CHRU Nancy, Université de Lorraine, INSERM, CIC -IT 1433 – Centre d'Investigation Clinique -Innovation Technologique, Nancy
- ³ Service de Gériatrie, Université de Lorraine, CHRU Nancy
- ⁴ Université de Lorraine, INSERM, UMR 1116 – Défaillance Cardiovasculaire Aigüe et Chronique, Nancy
- ⁵ Service des Examens de la Fonction Respiratoire, Université de Lorraine, CHRU Nancy
- ⁶ Université de Lorraine, EA 3450 DevAH – Développement, Adaptation et Handicap, Nancy
- ⁷ Service de Radiologie, Université de Lorraine, CHRU Nancy

Introduction

La pratique sportive d'un individu depuis son enfance impacte au moins son remodelage cardiaque¹. Ce dernier est fonction du sport pratiqué mais également de son entraînement. Au cours de l'étude COATRI, nous avons souhaité évaluer entre autres ces facteurs.

Objectif : caractériser la pratique sportive chez des triathlètes, notamment dans l'enfance et l'adolescence, et la comparer à celle de leur population témoin appariée

Matériel et méthodes

Nous avons inclus 34 triathlètes de sexe masculin en bonne santé (âge moyen : 33,8 ± 6,2 ans) et leurs 29 témoins appariés sur le sexe et l'âge. Les triathlètes devaient réaliser une épreuve longue distance au cours de l'année d'étude (half-Ironman ou Ironman) tandis que les sujets contrôles devaient avoir une activité physique hebdomadaire limitée (en-dessous des recommandations de l'OMS²). Un questionnaire dit « de vie sportive » a été rédigé spécialement pour l'étude et a été soumis à l'ensemble des volontaires, pour connaître leurs habitudes sportives depuis l'enfance.

Pour calculer la dépense énergétique de chaque volontaire en fonction des sports pratiqués, nous avons utilisé le Compendium des activités physiques³.

CODE	MET	GRANDE RUBRIQUE	ACTIVITES SPECIFIQUES
1065	8,5	Cyclisme	Cyclisme, 19,3 km/h, assis, mains sur les coccottes de frein ou en bas du guidon, 80 tr/min
1066	9,0	Cyclisme	Cyclisme, 19,3 km/h, en danseuse, mains sur les coccottes de frein, 60 tr/min
1070	5,0	Cyclisme	Monocyclisme
2001	2,3	Exercice physique	Jeu vidéo réclamant une activité (par ex. Wii Fit), effort léger (par ex. position d'équilibre, yoga)
2003	3,8	Exercice physique	Jeu vidéo réclamant une activité (par ex. Wii Fit), effort modéré (par ex. aérobic, résistance)

Résultats

	Tri	Ctrl	p-value (Tri/Ctrl)
Age de début (années)	7,6 (± 2,5)	9,2 (± 2,6)	0,024
Durée hebdomadaire d'entraînement pendant l'enfance (h/sem)	4,4 (± 3,3)	2,8 (± 1,8)	< 0,001
Dépense énergétique hebdomadaire (MET/sem)	37,2 (± 25,7)	19,6 (± 12,9)	< 0,001

Au cours de l'année d'étude, les triathlètes déclarent s'entraîner en moyenne 10,5 ± 2,4 h/semaine (hors activités annexes éventuelles). L'âge moyen de début de la pratique du triathlon est de 26,2 ± 6,2 ans.

Parmi les témoins, 23 ont arrêté le sport à l'âge moyen de 23,9 ± 6,0 ans. La raison principale est le manque de temps pour 40% d'entre eux.

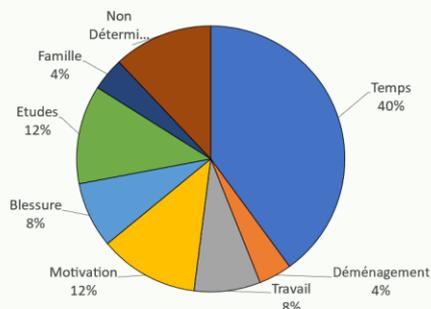
Conclusion

On constate que la pratique sportive régulière, débutée dans l'enfance, est significativement différente selon plusieurs paramètres évalués chez des personnes devenues triathlètes longue distance aujourd'hui, par rapport à un groupe témoin apparié. Il serait donc intéressant d'évaluer les facteurs ayant influencé dès l'enfance le choix de cet engagement sportif.

Bibliographie

1. McClean and al. Electrical and structural adaptations of the paediatric athlete's heart: a systematic review with meta-analysis. *Br J Sports Med.* 2018 Feb;52(4):230.
2. OMS, 2010. *Recommandations mondiales en matière d'activité physique pour la santé*
3. Ainsworth BE, Haskell WL, Herrmann SD, and al. Compendium of Physical Activities: a second update of codes and MET values. *Med Sci Sports Exerc.* 2011; 43(8):1575-81.

Raison principale de l'arrêt du sport



Nous tenions à remercier le CHRU de Nancy en tant que promoteur de l'étude COATRI, étude qui a bénéficié d'une participation financière de : « Appel à projets Jeunes Chercheurs – APIC du GIRCI Est 2017 ».

Annexe n°4 – Statistiques complémentaires : ANOVA

Les ANOVA ont été calculées afin de répondre à cette question : « Existe-t-il un effet groupe ou un effet visite ou un effet groupe+visite pour chaque paramètre étudié ? ».

Les valeurs de p significatives sont indiquées par *.

"Age"		
	Effect	$p < 0.05$
1	Num_Groupe	0.374
2	Num_Visite	8.34e-14*
3	Num_Groupe:Num_Visite	6.00e-03*

"Poids"		
	Effect	$p < 0.05$
1	Num_Groupe	0.046*
2	Num_Visite	0.014*
3	Num_Groupe:Num_Visite	0.194

"Taille"		
	Effect	$p < 0.05$
1	Num_Groupe	0.565
2	Num_Visite	<NA>
3	Num_Groupe:Num_Visite	<NA>

"IMC"		
	Effect	$p < 0.05$
1	Num_Groupe	0.014*
2	Num_Visite	0.012*
3	Num_Groupe:Num_Visite	0.214

"BSA"		
	Effect	$p < 0.05$
1	Num_Groupe	0.079
2	Num_Visite	0.016*
3	Num_Groupe:Num_Visite	0.186

"TAS moyenne mesurée dans l'IRM"		
	Effect	$p < 0.05$
1	Num_Groupe	0.747
2	Num_Visite	4.80e-06*
3	Num_Groupe:Num_Visite	0.161

"TAM moyenne mesurée dans l'IRM"		
	Effect	$p < 0.05$
1	Num_Groupe	0.579
2	Num_Visite	1.02e-04*
3	Num_Groupe:Num_Visite	0.233
"TAD moyenne mesurée dans l'IRM"		
	Effect	$p < 0.05$
1	Num_Groupe	0.255
2	Num_Visite	9.91e-04*
3	Num_Groupe:Num_Visite	0.353
"PP moyenne mesurée dans l'IRM"		
	Effect	$p < 0.05$
1	Num_Groupe	0.088
2	Num_Visite	0.062
3	Num_Groupe:Num_Visite	0.368
"FC dans l'IRM avant battements"		
	Effect	$p < 0.05$
1	Num_Groupe	8.47e-06*
2	Num_Visite	0.010*
3	Num_Groupe:Num_Visite	0.158
"FC dans l'IRM après battements"		
	Effect	$p < 0.05$
1	Num_Groupe	0.001*
2	Num_Visite	0.049*
3	Num_Groupe:Num_Visite	0.210
"Pourcentage de variation de la FC entre les deux"		
	Effect	$p < 0.05$
1	Num_Groupe	0.006*
2	Num_Visite	0.919
3	Num_Groupe:Num_Visite	0.718
"TAS moyenne mesurée en tonométrie"		
	Effect	$p < 0.05$
1	Num_Groupe	0.035*
2	Num_Visite	3.13e-07*
3	Num_Groupe:Num_Visite	0.487

"TAM moyenne mesurée en tonométrie"

	Effect	$p < 0.05$
1	Num_Groupe	0.356
2	Num_Visite	2.45e-08*
3	Num_Groupe:Num_Visite	0.408

"TAD moyenne mesurée en tonométrie"

	Effect	$p < 0.05$
1	Num_Groupe	0.858
2	Num_Visite	1.01e-06*
3	Num_Groupe:Num_Visite	0.374

"PP moyenne mesurée en tonométrie "

	Effect	$p < 0.05$
1	Num_Groupe	0.006*
2	Num_Visite	0.016*
3	Num_Groupe:Num_Visite	0.459

"PWV mesurée avec SphygmoCor"

	Effect	$p < 0.05$
1	Num_Groupe	0.033*
2	Num_Visite	0.013*
3	Num_Groupe:Num_Visite	0.003*

"TAS centrale mesurée par SphygmoCor"

	Effect	$p < 0.05$
1	Num_Groupe	0.426
2	Num_Visite	3.35e-04*
3	Num_Groupe:Num_Visite	0.265

"TAM centrale mesurée par SphygmoCor"

	Effect	$p < 0.05$
1	Num_Groupe	0.591
2	Num_Visite	1.82e-05*
3	Num_Groupe:Num_Visite	0.734

"TAD centrale mesurée par SphygmoCor"

	Effect	$p < 0.05$
1	Num_Groupe	0.974
2	Num_Visite	2.86e-05*
3	Num_Groupe:Num_Visite	0.652

"PP centrale mesurée par SphygmoCor"

	Effect	$p < 0.05$
1	Num_Groupe	0.136
2	Num_Visite	0.755
3	Num_Groupe:Num_Visite	0.325

"VOP mesurée par PulsePen"

	Effect	$p < 0.05$
1	Num_Groupe	0.002*
2	Num_Visite	0.014*
3	Num_Groupe:Num_Visite	0.084

"VTS du VG indexé"

	Effect	$p < 0.05$
1	Num_Groupe	2.39e-4*
2	Num_Visite	0.120
3	Num_Groupe:Num_Visite	0.497

"VTD du VG indexé"

	Effect	$p < 0.05$
1	Num_Groupe	0.001*
2	Num_Visite	1.31e-4*
3	Num_Groupe:Num_Visite	6.38e-4*

"VES du VG indexé"

	Effect	$p < 0.05$
1	Num_Groupe	0.020*
2	Num_Visite	0.032*
3	Num_Groupe:Num_Visite	0.032*

"FEVG"

	Effect	$p < 0.05$
1	Num_Groupe	0.004*
2	Num_Visite	0.701
3	Num_Groupe:Num_Visite	0.312

"Masse du VG indexée"

	Effect	$p < 0.05$
1	Num_Groupe	1.55e-17*
2	Num_Visite	0.062
3	Num_Groupe:Num_Visite	1.80e-02*

"VTS du VD indexé"		
	Effect	$p < 0.05$
1	Num_Groupe	0.115
2	Num_Visite	0.780
3	Num_Groupe:Num_Visite	0.708

"VTD du VD indexé"		
	Effect	$p < 0.05$
1	Num_Groupe	0.002*
2	Num_Visite	0.034*
3	Num_Groupe:Num_Visite	0.104

"VES du VD indexé"		
	Effect	$p < 0.05$
1	Num_Groupe	1.69e-05*
2	Num_Visite	3.10e-02*
3	Num_Groupe:Num_Visite	9.90e-02

"FEVD"		
	Effect	$p < 0.05$
1	Num_Groupe	0.045*
2	Num_Visite	0.356
3	Num_Groupe:Num_Visite	0.212

"Débit aortique avant battements en mL/batt cardiaque"		
	Effect	$p < 0.05$
1	Num_Groupe	2.71e-06*
2	Num_Visite	3.10e-02*
3	Num_Groupe:Num_Visite	0.129

"Débit aortique après battements en mL/batt cardiaque"		
	Effect	$p < 0.05$
1	Num_Groupe	3.40e-04*
2	Num_Visite	0.168
3	Num_Groupe:Num_Visite	0.133

"Pourcentage de variation du débit aortique en mL/batt cardiaque"		
	Effect	$p < 0.05$
1	Num_Groupe	0.174
2	Num_Visite	0.631
3	Num_Groupe:Num_Visite	0.685

"Débit aortique avant battements en L/min"

	Effect	$p < 0.05$
1	Num_Groupe	0.358
2	Num_Visite	0.495
3	Num_Groupe:Num_Visite	0.533

"Débit aortique après battements en L/min"

	Effect	$p < 0.05$
1	Num_Groupe	0.954
2	Num_Visite	0.156
3	Num_Groupe:Num_Visite	0.715

"Pourcentage de variation du débit aortique en L/min"

	Effect	$p < 0.05$
1	Num_Groupe	0.380
2	Num_Visite	0.417
3	Num_Groupe:Num_Visite	0.427

"T1 moyen du septum interventriculaire"

	Effect	$p < 0.05$
1	Num_Groupe	2.42e-04*
2	Num_Visite	0.351
3	Num_Groupe:Num_Visite	0.592

"T1 moyen de la zone de jonction"

	Effect	$p < 0.05$
1	Num_Groupe	0.007*
2	Num_Visite	0.824
3	Num_Groupe:Num_Visite	0.135

"T1 moyen du sang intraventriculaire"

	Effect	$p < 0.05$
1	Num_Groupe	0.121
2	Num_Visite	0.002*
3	Num_Groupe:Num_Visite	0.567

"T1 moyen du muscle pectoral"

	Effect	$p < 0.05$
1	Num_Groupe	0.006*
2	Num_Visite	0.235
3	Num_Groupe:Num_Visite	0.708

"T1 moyen du muscle grand dorsal"

	Effect	$p < 0.05$
1	Num_Groupe	0.198
2	Num_Visite	0.168
3	Num_Groupe:Num_Visite	0.188

"Section aortique minimale en cm2 de l'aorte ascendante"

	Effect	$p < 0.05$
1	Num_Groupe	0.089
2	Num_Visite	0.886
3	Num_Groupe:Num_Visite	0.368

"Section aortique maximale en cm2 de l'aorte ascendante"

	Effect	$p < 0.05$
1	Num_Groupe	0.043*
2	Num_Visite	0.913
3	Num_Groupe:Num_Visite	0.266

"Strain de l'aorte ascendante en %"

	Effect	$p < 0.05$
1	Num_Groupe	0.243
2	Num_Visite	0.743
3	Num_Groupe:Num_Visite	0.703

"Section aortique minimale en cm2 de l'aorte descendante"

	Effect	$p < 0.05$
1	Num_Groupe	0.003*
2	Num_Visite	0.432
3	Num_Groupe:Num_Visite	0.982

"Section aortique maximale en cm2 de l'aorte descendante"

	Effect	$p < 0.05$
1	Num_Groupe	0.002*
2	Num_Visite	0.509
3	Num_Groupe:Num_Visite	0.760

"Strain de l'aorte descendante en %"

	Effect	$p < 0.05$
1	Num_Groupe	0.301
2	Num_Visite	0.150
3	Num_Groupe:Num_Visite	0.601

"Compliance de l'aorte ascendante calculée avec la PP centrale"

	Effect	$p < 0.05$
1	Num_Groupe	0.016*
2	Num_Visite	0.711
3	Num_Groupe:Num_Visite	0.208

"Compliance de l'aorte ascendante calculée avec la PP périphérique"

	Effect	$p < 0.05$
1	Num_Groupe	0.010*
2	Num_Visite	0.555
3	Num_Groupe:Num_Visite	0.677

"Compliance de l'aorte descendante calculée avec la PP centrale"

	Effect	$p < 0.05$
1	Num_Groupe	0.165
2	Num_Visite	0.611
3	Num_Groupe:Num_Visite	0.967

"Compliance de l'aorte descendante calculée avec la PP périphérique"

	Effect	$p < 0.05$
1	Num_Groupe	0.169
2	Num_Visite	0.297
3	Num_Groupe:Num_Visite	0.728

"Distensibilité de l'aorte ascendante calculée avec la PP centrale"

	Effect	$p < 0.05$
1	Num_Groupe	0.698
2	Num_Visite	0.653
3	Num_Groupe:Num_Visite	0.234

"Distensibilité de l'aorte ascendante calculée avec la PP périphérique"

	Effect	$p < 0.05$
1	Num_Groupe	0.477
2	Num_Visite	0.815
3	Num_Groupe:Num_Visite	0.734

"Distensibilité de l'aorte descendante calculée avec la PP centrale"

	Effect	$p < 0.05$
1	Num_Groupe	0.039*
2	Num_Visite	0.450
3	Num_Groupe:Num_Visite	0.871

"Distensibilité de l'aorte descendante calculée avec la PP périphérique"

	Effect	$p < 0.05$
1	Num_Groupe	0.055
2	Num_Visite	0.098
3	Num_Groupe:Num_Visite	0.544

"Distensibilité avec PWV "

	Effect	$p < 0.05$
1	Num_Groupe	0.033*
2	Num_Visite	0.011*
3	Num_Groupe:Num_Visite	0.013*

"Index_cardiaque"

	Effect	$p < 0.05$
1	Num_Groupe	0.069
2	Num_Visite	0.024*
3	Num_Groupe:Num_Visite	0.099

"Stroke work"

	Effect	$p < 0.05$
1	Num_Groupe	0.001*
2	Num_Visite	0.003*
3	Num_Groupe:Num_Visite	0.072

"Total Arterial Compliance"

	Effect	$p < 0.05$
1	Num_Groupe	0.017*
2	Num_Visite	0.612
3	Num_Groupe:Num_Visite	0.667

"Total Peripheral Vascular Resistance"

	Effect	$p < 0.05$
1	Num_Groupe	0.364
2	Num_Visite	0.357
3	Num_Groupe:Num_Visite	0.008*

"Elastance artérielle"

	Effect	$p < 0.05$
1	Num_Groupe	2.11e-04*
2	Num_Visite	0.680
3	Num_Groupe:Num_Visite	0.275

"Elastance ventriculaire"		
	Effect	$p < 0.05$
1	Num_Groupe	0.012*
2	Num_Visite	0.301
3	Num_Groupe:Num_Visite	0.148

"Couplage ventriculo-aortique"		
	Effect	$p < 0.05$
1	Num_Groupe	0.001*
2	Num_Visite	0.272
3	Num_Groupe:Num_Visite	0.227

Annexe n°5 – Autres travaux d'encadrement

Protection cutanée et sport : étude chez les triathlètes licencié(e)s de la région Grand Est

Direction de thèse pour obtenir le grade de Docteur en Médecine, soutenue par Monsieur Anthony CHLEBICZ le 17 décembre 2020 à la Faculté de Médecine de Nancy

Etude comparative de l'impact de deux programmes de réentraînement sur les paramètres fonctionnels chez l'insuffisant cardiaque

Gestion et rédaction de la partie statistiques + aide à la rédaction du mémoire de DESC de Médecine du Sport, soutenu par Monsieur David ERNST en septembre 2020 lors du 11^e congrès commun SFMES-SFTS à Vichy

Place d'un programme d'entraînement en ligne au poids du corps (FREELETICS®) dans une démarche de sport-santé

Direction de thèse pour obtenir le grade de Docteur en Médecine, soutenue par Monsieur Victor LALEVEE le 1^{er} juillet 2019 à la Faculté de Médecine de Nancy

Prise en charge d'une douleur testiculaire chronique chez un homme marié et respect du secret médical – récit de situation complexe authentique (RSCA)

Direction de mémoire de DES de Médecine Générale, soutenu par Monsieur Victor LALEVEE en octobre 2017 à la Faculté de Médecine de Nancy

Annexe n°6 – Publications en tant que premier auteur

G Model JSAMS 14111-4	ARTICLE IN PRESS	
Journal of Science and Medicine in Sport xxx (2016) xxx–xxx		
	<p>Contents lists available at ScienceDirect</p> <h3>Journal of Science and Medicine in Sport</h3> <p>journal homepage: www.elsevier.com/locate/jsams</p>	
Original research		
<h2>Aortic compliance variation in long male distance triathletes: A new insight into the athlete's artery?</h2>		
Anne-Charlotte Dupont ^a , Mathias Poussel ^{b,c} , Gabriela Hossu ^d , Pierre-Yves Marie ^{e,f,g} , Bruno Chenuel ^{b,c} , Jacques Felblinger ^{a,d,e} , Damien Mandry ^{a,e,g,*}		
<p>^a INSERM, IADI U 947, France ^b CHRU Nancy, Department of Pulmonary Function Testing and Exercise Physiology, France ^c Université de Lorraine, EA 3450 DevAH—Development, Adaptation and Disadvantage, Cardiorespiratory Regulations and Motor Control, France ^d INSERM, CIC-IT 1433, France ^e CHRU Nancy, Department of Medical Imaging, France ^f INSERM UMR-1116, France ^g Université de Lorraine, France</p>		
ARTICLE INFO	ABSTRACT	
<p>Article history: Received 21 February 2016 Received in revised form 21 September 2016 Accepted 21 October 2016 Available online xxx</p>	<p>Objectives: To assess cardiac and vascular adaptations in long-distance male triathletes and the influence of an increased training volume on these parameters. Design: Case-control study using long-distance male triathletes (Tri) (n = 12) and an age-matched cohort of sedentary volunteers (Ctrl). Methods: All participants gave an informed consent and underwent a Cardiovascular Magnetic Resonance imaging (CMR) exam to measure left and right ventricle functional parameters, and aortic parameters (surface, strain, compliance, pulse wave velocity). This exam was repeated in the triathletes' group after an increased training volume of at least 2 h/week for six weeks. Results: Compared to control volunteers, triathletes presented at baseline a typical pattern of athlete's heart (higher end-diastolic, end-systolic and stroke volumes index, $p \leq 0.009$, and lower cardiac rate, $p = 0.015$) but similar vascular characteristics except a trend towards an enlarged ascending aorta (surface 942 ± 106 vs 812 ± 127 mm², $p = 0.058$). Between the two visits, the triathletes increased their weekly training time from 9.67 ± 2.43 (Tri1) to 12.15 ± 3.01 h (Tri2): no modifications were found regarding cardiac parameters, but compliance and distensibility of the ascending aorta increased, from 2.60 to 3.34 mm²/mmHg ($p = 0.028$) and from 3.36 to 4.40×10^{-3} mmHg⁻¹ ($p = 0.048$) respectively. Conclusions: Using CMR, we showed that vascular characteristics of the ascending aorta may vary along the sport season in endurance athletes. This remodelling could be considered as a physiological adaptation, but could eventually lead to an adverse vascular remodelling.</p> <p>© 2016 Sports Medicine Australia. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.</p>	
<p>Keywords: Vascular stiffness (G09.330.940) Compliance (G01.374.590.210) Magnetic resonance imaging (E01.370.350.825.500) Athletes (M01.072) Triathlon</p>		
1. Introduction		
<p>The health benefits of regular moderate intensity exercise are well demonstrated,¹ but the upper limit of this relation is regularly questioned, especially regarding possible sports-related cardiac injuries in endurance athletes.² Dealing with this specific population, most studies focused on the cardiac remodelling consecutive to prolonged intense endurance exercise, and the athlete's heart characteristics are now well established.^{3,4,5} Intense endurance exercise bouts have also been shown to involve more acute functional and biochemical cardiac dysfunctions, with an</p>	<p>unclear significance.⁶ Overall, it appears that exercise in excess may sometimes specifically harm the heart.² Some evidence also suggest the concept of an "athlete's artery", even if these vascular adaptations in athletes have not yet been fully characterized. Interestingly, studies dealing with the effect of long term and regular endurance exercise training on central blood pressure reveal contrasting findings. For instance, some authors show that, compared to healthy controls, endurance athletes have lower aortic pressure⁷ whereas some other show comparable aortic function.⁸ In these contrasting studies, the lack of adjustment for confounding factors (among them, no doubt that the amount of training volume plays an important role) is generally discussed as a possible explanation. Cardiac Magnetic Resonance imaging (CMR) has now been accepted as the reference for cardiac assessment in the athletic population,⁹ but most studies dealing with vascular adaptation in athletes are</p>	
<p>* Corresponding author. E-mail address: d.mandry@chu-nancy.fr (D. Mandry).</p>		
<p>http://dx.doi.org/10.1016/j.jsams.2016.10.009 1440-2440/© 2016 Sports Medicine Australia. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.</p>		
<p>Please cite this article in press as: Dupont A-C, et al. Aortic compliance variation in long male distance triathletes: A new insight into the athlete's artery? <i>J Sci Med Sport</i> (2016), http://dx.doi.org/10.1016/j.jsams.2016.10.009</p>		

Science et Sports

From training to overtraining: the necessity of an integrated approach.

--Manuscript Draft--

Manuscript Number:	
Article Type:	Letter to the Editor
Keywords:	training, overtraining, monitoring
Corresponding Author:	Anne-Charlotte DUPONT FRANCE
First Author:	Anne-Charlotte DUPONT
Order of Authors:	Anne-Charlotte DUPONT Gabriela HOSSU Aboubaker CHERIFI Marine BEAUMONT Damien MANDRY Mathias POUSSEL
Suggested Reviewers:	
Secondary Full Title:	De l'entraînement au surentraînement : la nécessité d'une approche intégrée.
Secondary Keywords:	entraînement, surentraînement, monitoring

Bibliographie

1. Dupont A-C, Poussel M, Hossu G, Marie P-Y, Chenuel B, Felblinger J, et al. Aortic compliance variation in long male distance triathletes: A new insight into the athlete's artery? *J Sci Med Sport*. juin 2017;20(6):539-42.
2. Définitions : endurance - Dictionnaire de français Larousse [Internet]. [cité 31 janv 2021]. Disponible sur: <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/endurance/29402>
3. Tsuji T, Kanamori S, Saito M, Watanabe R, Miyaguni Y, Kondo K. Specific types of sports and exercise group participation and socio-psychological health in older people. *J Sports Sci*. févr 2020;38(4):422-9.
4. Martinez-Gomez D, Lavie CJ, Hamer M, Cabanas-Sanchez V, Garcia-Esquinas E, Pareja-Galeano H, et al. Physical activity without weight loss reduces the development of cardiovascular disease risk factors - a prospective cohort study of more than one hundred thousand adults. *Prog Cardiovasc Dis*. déc 2019;62(6):522-30.
5. Cantwell M, Walsh D, Furlong B, Loughney L, McCaffrey N, Moyna N, et al. Physical Activity Across the Cancer Journey: Experiences and Recommendations From People Living With and Beyond Cancer. *Phys Ther*. 10 2020;100(3):575-85.
6. Reiman MP. Chapter 5 - Training for Strength, Power, and Endurance. In: Manske RC, éditeur. *Postsurgical Orthopedic Sports Rehabilitation* [Internet]. Saint Louis: Mosby; 2006 [cité 7 avr 2020]. p. 87-112. Disponible sur: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323027021500089>
7. Matelot D, Schnell F, Kervio G, Ridard C, Thillaye du Boullay N, Wilson M, et al. Cardiovascular Benefits of Endurance Training in Seniors: 40 is not too Late to Start. *Int J Sports Med*. juill 2016;37(8):625-32.
8. Organisation Mondiale de la Santé. Recommandations mondiales sur l'activité physique pour la santé [Internet]. Organisation Mondiale de la Santé; 2010. Disponible sur: http://whqlibdoc.who.int/publications/2010/9789242599978_fre.pdf?ua=1
9. Données de la société Ironman® - The Ironman® Group. 2020.
10. Natation en eau libre 10 km (H), les résultats Jeux olympiques Rio de Janeiro 2016 - L'Équipe.fr [Internet]. [cité 20 avr 2020]. Disponible sur: https://www.lequipe.fr/Jo/JoResultatAutre108_500000000013467.html
11. Natation en eau libre 10 km (F), les résultats Jeux olympiques Rio de Janeiro 2016 [Internet]. L'Équipe. [cité 20 avr 2020]. Disponible sur: https://www.lequipe.fr/Jo/JoResultatAutre108_500000000013468.html

12. Calendrier et résultats Cyclisme sur route du Jeux Olympiques d'été Rio 2016 [Internet]. L'Équipe. [cité 20 avr 2020]. Disponible sur: <https://www.lequipe.fr/jeux-olympiques/jo-rio-2016-programme-calendrier-cyclisme-sur-route.html>
13. Palmarès des médailles Athlétisme - Marathon hommes aux Jeux Olympiques [Internet]. L'Équipe. [cité 20 avr 2020]. Disponible sur: https://www.lequipe.fr/Jo/JoPodium40_26_H.html
14. Palmarès des médailles Athlétisme - Marathon femmes aux Jeux Olympiques [Internet]. L'Équipe. [cité 20 avr 2020]. Disponible sur: https://www.lequipe.fr/Jo/JoPodium40_26_F.html
15. Union IT. Results: Elite Men | 2016 Rio de Janeiro Olympic Games [Internet]. Triathlon.org. [cité 20 avr 2020]. Disponible sur: https://www.triathlon.org/results/result/2016_rio_de_janeiro_olympic_games/305290
16. Union IT. Results: Elite Women | 2016 Rio de Janeiro Olympic Games [Internet]. Triathlon.org. [cité 20 avr 2020]. Disponible sur: https://www.triathlon.org/results/result/2016_rio_de_janeiro_olympic_games/305291
17. Asmussen E. Similarities and dissimilarities between static and dynamic exercise. *Circ Res.* juin 1981;48(6 Pt 2):13-10.
18. Mitchell JH, Haskell WL, Raven PB. Classification of sports. *J Am Coll Cardiol.* oct 1994;24(4):864-6.
19. Levine BD, Baggish AL, Kovacs RJ, Link MS, Maron MS, Mitchell JH. Eligibility and Disqualification Recommendations for Competitive Athletes With Cardiovascular Abnormalities: Task Force 1: Classification of Sports: Dynamic, Static, and Impact. :5.
20. Maron BJ, Zipes DP. 36th Bethesda Conference: Eligibility Recommendations for Competitive Athletes With Cardiovascular Abnormalities. *J Am Coll Cardiol.* avr 2005;45(8):1312.
21. Maron BJ, Mitchell JH. Revised eligibility recommendations for competitive athletes with cardiovascular abnormalities. *J Am Coll Cardiol.* 1 oct 1994;24(4):848-50.
22. Pelliccia A, Sharma S, Gati S, Bäck M, Börjesson M, Caselli S, et al. 2020 ESC Guidelines on sports cardiology and exercise in patients with cardiovascular disease: The Task Force on sports cardiology and exercise in patients with cardiovascular disease of the European Society of Cardiology (ESC). *Eur Heart J.* 1 janv 2021;42(1):17-96.
23. Wyatt HL, Mitchell JH. Influences of Physical Training on the Heart of Dogs. *Circ Res.* déc 1974;35(6):883-9.
24. Longhurst JC, Kelly AR, Gonyea WJ, Mitchell JH. Echocardiographic left ventricular masses in distance runners and weight lifters. *J Appl Physiol.* janv 1980;48(1):154-62.
25. Longhurst JC, Kelly AR, Gonyea WJ, Mitchell JH. Chronic training with static and dynamic exercise: cardiovascular adaptation, and response to exercise. *Circ Res.* juin 1981;48(6 Pt 2):171-178.
26. Morganroth J, Maron BJ, Henry WL, Epstein SE. Comparative Left Ventricular Dimensions in Trained Athletes. *Ann Intern Med.* 1 avr 1975;82(4):521-4.

27. Dysfonction ventriculaire gauche | Cardiac Anesthesia Textbook 5 - chapitre 5.9 [Internet]. [cité 7 mars 2021]. Disponible sur: <https://www.pac5.ch/en/node/457/take>
28. Koeplin F. [Morphology and function of the athletic heart]. *Schweiz Med Wochenschr.* 30 sept 1950;80(39):1053-7; contd.
29. Elias Neder J. [Cardiac modifications in over training; athletic heart]. *Med Deporte Trab.* mars 1951;15(98):4010-8.
30. Dietlen H. [Athletic heart]. *Munchener Med Wochenschr* 1950. 26 oct 1951;93(43):2138-42; contd.
31. Zeldis SM, Morganroth J, Rubler S. Cardiac hypertrophy in response to dynamic conditioning in female athletes. *J Appl Physiol.* juin 1978;44(6):849-52.
32. Morganroth J, Maron BJ. The Athlete's Heart Syndrome: A New Perspective. *Ann N Y Acad Sci.* 1977;301(1):931-41.
33. Pelliccia A, Maron BJ, Spataro A, Proschan MA, Spirito P. The upper limit of physiologic cardiac hypertrophy in highly trained elite athletes. *N Engl J Med.* 31 janv 1991;324(5):295-301.
34. Netgen. Cœur d'athlète : frontière entre physiologie et pathologie [Internet]. *Revue Médicale Suisse.* [cité 12 sept 2020]. Disponible sur: <https://www.revmed.ch/RMS/2012/RMS-349/Coeur-d-athlete-frontiere-entre-physiologie-et-pathologie>
35. Spirito P, Pelliccia A, Proschan MA, Granata M, Spataro A, Bellone P, et al. Morphology of the "athlete's heart" assessed by echocardiography in 947 elite athletes representing 27 sports. *Am J Cardiol.* oct 1994;74(8):802-6.
36. Pluim BM, Zwinderman AH, van der Laarse A, van der Wall EE. The Athlete's Heart : A Meta-Analysis of Cardiac Structure and Function. *Circulation.* 25 janv 2000;101(3):336-44.
37. Haykowsky MJ, Samuel TJ, Nelson MD, La Gerche A. Athlete's Heart: Is the Morganroth Hypothesis Obsolete? *Heart Lung Circ.* sept 2018;27(9):1037-41.
38. La Gerche A, Heidbüchel H, Burns AT, Mooney DJ, Taylor AJ, Pflugger HB, et al. Disproportionate exercise load and remodeling of the athlete's right ventricle. *Med Sci Sports Exerc.* juin 2011;43(6):974-81.
39. Arbab-Zadeh A, Perhonen M, Howden E, Peshock RM, Zhang R, Adams-Huet B, et al. Cardiac Remodeling in Response to 1 Year of Intensive Endurance Training. *Circulation.* 9 déc 2014;130(24):2152-61.
40. Weiner RB, DeLuca JR, Wang F, Lin J, Wasfy MM, Berkstresser B, et al. Exercise-Induced Left Ventricular Remodeling Among Competitive Athletes: A Phasic Phenomenon. *Circ Cardiovasc Imaging.* déc 2015;8(12).
41. Beaudry R, Haykowsky MJ, Baggish A, La Gerche A. A Modern Definition of the Athlete's Heart-for Research and the Clinic. *Cardiol Clin.* nov 2016;34(4):507-14.
42. Dickhuth HH, Röcker K, Hipp A, Heitkamp HC, Keul J. Echocardiographic findings in endurance athletes with hypertrophic non-obstructive cardiomyopathy (HNCM) compared to non-athletes

- with HNCM and to physiological hypertrophy (athlete's heart). *Int J Sports Med.* juill 1994;15(5):273-7.
43. Lauschke J, Maisch B. Athlete's heart or hypertrophic cardiomyopathy? *Clin Res Cardiol.* févr 2009;98(2):80-8.
 44. Czibalmos C, Csecs I, Toth A, Kiss O, Suhai FI, Sydo N, et al. The demanding grey zone: Sport indices by cardiac magnetic resonance imaging differentiate hypertrophic cardiomyopathy from athlete's heart. *PLoS ONE* [Internet]. 14 févr 2019 [cité 24 mai 2020];14(2). Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6375568/>
 45. Schnell F, Matelot D, Daudin M, Kervio G, Mabo P, Carré F, et al. Mechanical Dispersion by Strain Echocardiography: A Novel Tool to Diagnose Hypertrophic Cardiomyopathy in Athletes. *J Am Soc Echocardiogr.* mars 2017;30(3):251-61.
 46. Luijkx T, Cramer MJ, Buckens CF, Zaidi A, Rienks R, Mosterd A, et al. Unravelling the grey zone: cardiac MRI volume to wall mass ratio to differentiate hypertrophic cardiomyopathy and the athlete's heart. *Br J Sports Med.* 1 nov 2015;49(21):1404-9.
 47. Galderisi M, Cardim N, D'Andrea A, Bruder O, Cosyns B, Davin L, et al. The multi-modality cardiac imaging approach to the Athlete's heart: an expert consensus of the European Association of Cardiovascular Imaging. *Eur Heart J - Cardiovasc Imaging.* 1 avr 2015;16(4):353-353r.
 48. Mavrogeni SI, Bacopoulou F, Apostolaki D, Chrousos GP. Sudden cardiac death in athletes and the value of cardiovascular magnetic resonance. *Eur J Clin Invest.* juill 2018;48(7):e12955.
 49. Heidbüchel H, La Gerche A. The right heart in athletes: Evidence for exercise-induced arrhythmogenic right ventricular cardiomyopathy. *Herzschrittmachertherapie Elektrophysiologie.* juin 2012;23(2):82-6.
 50. La Gerche A, Claessen G, Dymarkowski S, Voigt J-U, De Buck F, Vanhees L, et al. Exercise-induced right ventricular dysfunction is associated with ventricular arrhythmias in endurance athletes. *Eur Heart J.* 7 août 2015;36(30):1998-2010.
 51. Gülan U, Saguner AM, Akdis D, Gotschy A, Tanner FC, Kozerke S, et al. Hemodynamic Changes in the Right Ventricle Induced by Variations of Cardiac Output: A Possible Mechanism for Arrhythmia Occurrence in the Outflow Tract. *Sci Rep* [Internet]. 14 janv 2019 [cité 24 mai 2020];9. Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6331649/>
 52. Calvo N, Brugada J, Sitges M, Mont L. Atrial fibrillation and atrial flutter in athletes. *Br J Sports Med.* nov 2012;46(Suppl 1):i37-43.
 53. Estes NAM, Madias C. Atrial Fibrillation in Athletes: A Lesson in the Virtue of Moderation. *JACC Clin Electrophysiol.* 2017;3(9):921-8.
 54. Mohanty S, Mohanty P, Tamaki M, Natale V, Gianni C, Trivedi C, et al. Differential Association of Exercise Intensity With Risk of Atrial Fibrillation in Men and Women: Evidence from a Meta-Analysis: Gender-Specific Link of Exercise Intensity With AF. *J Cardiovasc Electrophysiol.* sept 2016;27(9):1021-9.
 55. Hubert A, Galand V, Donal E, Pavin D, Galli E, Martins RP, et al. Atrial function is altered in lone paroxysmal atrial fibrillation in male endurance veteran athletes. *Eur Heart J - Cardiovasc Imaging.* 1 févr 2018;19(2):145-53.

56. Elliott AD, Mahajan R, Linz D, Stokes M, Verdicchio CV, Middeldorp ME, et al. Atrial remodeling and ectopic burden in recreational athletes: Implications for risk of atrial fibrillation. *Clin Cardiol.* 12 juin 2018;41(6):843-8.
57. Pelliccia A, Culasso F, Di Paolo FM, Maron BJ. Physiologic left ventricular cavity dilatation in elite athletes. *Ann Intern Med.* 5 janv 1999;130(1):23-31.
58. Abergel E, Chatellier G, Hagege AA, Oblak A, Linhart A, Ducardonnet A, et al. Serial left ventricular adaptations in world-class professional cyclists: Implications for disease screening and follow-up. *J Am Coll Cardiol.* 7 juill 2004;44(1):144-9.
59. Kasikcioglu HA, Kasikcioglu E, Oflaz H, Unal S, Topcu B, Tartan Z, et al. Discrimination between physiologic and pathologic left ventricular dilatation. *Int J Cardiol.* mai 2006;109(2):288-90.
60. Wilson M, O'Hanlon R, Prasad S, Deighan A, MacMillan P, Oxborough D, et al. Diverse patterns of myocardial fibrosis in lifelong, veteran endurance athletes. *J Appl Physiol.* 2011;110:5.
61. Eijvogels TMH, Oxborough DL, O'Hanlon R, Sharma S, Prasad S, Whyte G, et al. Global and regional cardiac function in lifelong endurance athletes with and without myocardial fibrosis. *Eur J Sport Sci.* 26 nov 2017;17(10):1297-303.
62. Tahir E, Starekova J, Muellerleile K, Freiwald E, von Stritzky A, Münch J, et al. Impact of Myocardial Fibrosis on Left Ventricular Function Evaluated by Feature-Tracking Myocardial Strain Cardiac Magnetic Resonance in Competitive Male Triathletes With Normal Ejection Fraction. *Circ J Off J Jpn Circ Soc.* 25 2019;83(7):1553-62.
63. Małek ŁA, Barczuk-Falęcka M, Werys K, Czajkowska A, Mróz A, Witek K, et al. Cardiovascular magnetic resonance with parametric mapping in long-term ultra-marathon runners. *Eur J Radiol.* 1 août 2019;117:89-94.
64. Thiblin I, Lindquist O, Rajs J. Cause and manner of death among users of anabolic androgenic steroids. *J Forensic Sci.* janv 2000;45(1):16-23.
65. O'Keefe JH, Patil HR, Lavie CJ, Magalski A, Vogel RA, McCullough PA. Potential Adverse Cardiovascular Effects From Excessive Endurance Exercise. *Mayo Clin Proc.* juin 2012;87(6):587-95.
66. Maestrini V, Torlasco C, Hughes R, Moon JC. Cardiovascular Magnetic Resonance and Sport Cardiology: a Growing Role in Clinical Dilemmas. *J Cardiovasc Transl Res [Internet].* 20 mai 2020 [cité 1 juin 2020]; Disponible sur: <http://link.springer.com/10.1007/s12265-020-10022-7>
67. Sunagawa K, Maughan WL, Burkhoff D, Sagawa K. Left ventricular interaction with arterial load studied in isolated canine ventricle. *Am J Physiol.* nov 1983;245(5 Pt 1):H773-780.
68. Sunagawa K, Sagawa K, Maughan WL. Ventricular interaction with the loading system. *Ann Biomed Eng.* 1984;12(2):163-89.
69. Morimont P, Lambermont B, Ghuysen A, Gerard P, Kolh P, D'Orio V. Le couplage ventriculoartériel : du concept aux applications cliniques. *Réanimation.* avr 2009;18(3):201-6.
70. Nichols WW, Conti CR, Walker WE, Milnor WR. Input impedance of the systemic circulation in man. *Circ Res.* mai 1977;40(5):451-8.

71. Nichols WW, Pepine CJ, Geiser EA, Conti CR. Vascular load defined by the aortic input impedance spectrum. *Fed Proc.* févr 1980;39(2):196-201.
72. Burkhoff D, Alexander J, Schipke J. Assessment of Windkessel as a model of aortic input impedance. *Am J Physiol.* oct 1988;255(4 Pt 2):H742-753.
73. Sagawa K, Maughan WL, Suga H, Sunagawa K. Cardiac contraction and the pressure-volume relationship. 1988.
74. Monge García MI, Jian Z, Settels JJ, Hunley C, Cecconi M, Hatib F, et al. Determinants of left ventricular ejection fraction and a novel method to improve its assessment of myocardial contractility. *Ann Intensive Care.* 16 avr 2019;9(1):48.
75. Radovits T, Oláh A, Lux Á, Németh BT, Hidi L, Birtalan E, et al. Rat model of exercise-induced cardiac hypertrophy: hemodynamic characterization using left ventricular pressure-volume analysis. *Am J Physiol-Heart Circ Physiol.* 1 juill 2013;305(1):H124-34.
76. Asanoi H, Kameyama T, Ishizaka S, Sasayama S. [Ventriculo-arterial coupling during aerobic and anaerobic exercise in normal subjects]. *J Cardiol.* 1990;20(2):423-9.
77. Florescu M, Stoicescu C, Magda S, Petcu I, Radu M, Palombo C, et al. "Supranormal" Cardiac Function in Athletes Related to Better Arterial and Endothelial Function. *Echocardiography.* 2010;27(6):659-67.
78. Sahlén A, Shahgaldi K, Aagaard P, Manouras A, Winter R, Braunschweig F. Altered ventriculo-arterial coupling during exercise in athletes releasing biomarkers after endurance running. *Eur J Appl Physiol.* déc 2012;112(12):4069-79.
79. Tartière-Kesri L, Tartière J-M, Logeart D, Beauvais F, Cohen Solal A. Increased Proximal Arterial Stiffness and Cardiac Response With Moderate Exercise in Patients With Heart Failure and Preserved Ejection Fraction. *J Am Coll Cardiol.* janv 2012;59(5):455-61.
80. Boutinet S. Rôle du calcium intracellulaire dans la compliance de l'artère carotide de rat : effets d'un inhibiteur de l'enzyme de conversion de l'angiotensine 1 [Médecine humaine et pathologie]. Université Henri Poincaré - Nancy I; 1995.
81. Vizzardi E, Caretta G, Bonadei I, Rovetta R, Sciatti E, Pezzali N, et al. Echocardiographic elastic properties of ascending aorta and their relationship with exercise capacity in patients with non-ischemic dilated cardiomyopathy. *Int J Cardiol Heart Vessels.* 18 avr 2014;3:78-81.
82. Ooi H, Chung W, Biolo A. Arterial Stiffness and Vascular Load in Heart Failure. *Congest Heart Fail.* 2008;14(1):31-6.
83. Wei M. Relationship Between Low Cardiorespiratory Fitness and Mortality in Normal-Weight, Overweight, and Obese Men. *JAMA.* 27 oct 1999;282(16):1547.
84. Cavalcante JL, Lima JAC, Redheuil A, Al-Mallah MH. Aortic Stiffness. *J Am Coll Cardiol.* avr 2011;57(14):1511-22.
85. O'Rourke MF, Staessen JA, Vlachopoulos C, Duprez D, Plante GE. Clinical applications of arterial stiffness; definitions and reference values. *Am J Hypertens.* mai 2002;15(5):426-44.

86. Laurent S, Cockcroft J, Van Bortel L, Boutouyrie P, Giannattasio C, Hayoz D, et al. Expert consensus document on arterial stiffness: methodological issues and clinical applications. *Eur Heart J*. nov 2006;27(21):2588-605.
87. Vaitkevicius PV, Fleg JL, Engel JH, O'Connor FC, Wright JG, Lakatta LE, et al. Effects of age and aerobic capacity on arterial stiffness in healthy adults. *Circulation*. oct 1993;88(4):1456-62.
88. Ahmadi-Abhari S, Sabia S, Shipley MJ, Kivimäki M, Singh-Manoux A, Tabak A, et al. Physical Activity, Sedentary Behavior, and Long-Term Changes in Aortic Stiffness: The Whitehall II Study. *J Am Heart Assoc*. 7 août 2017;6(8).
89. Miyachi M, Iemitsu M, Okutsu M, Onodera S. Effects of endurance training on the size and blood flow of the arterial conductance vessels in humans. *Acta Physiol Scand*. 1998;163(1):13-6.
90. Roman MJ, Devereux RB, Kramer-Fox R, O'Loughlin J. Two-dimensional echocardiographic aortic root dimensions in normal children and adults. *Am J Cardiol*. 1 sept 1989;64(8):507-12.
91. Vriz O, Aboyans V, D'Andrea A, Ferrara F, Acri E, Limongelli G, et al. Normal values of aortic root dimensions in healthy adults. *Am J Cardiol*. 15 sept 2014;114(6):921-7.
92. Aparci M, Erdal M, Isilak Z, Yalcin M, Uz O, Arslan Z, et al. Enlargement of the aorta: An occupational disease? *Exp Clin Cardiol*. 2013;18(2):93-7.
93. D'Andrea A, Cocchia R, Riegler L, Scarafile R, Salerno G, Gravino R, et al. Aortic Root Dimensions in Elite Athletes. *Am J Cardiol*. juin 2010;105(11):1629-34.
94. Iskandar A, Thompson PD. A Meta-Analysis of Aortic Root Size in Elite Athletes. *Circulation*. 19 févr 2013;127(7):791-8.
95. Pelliccia A, Di Paolo FM, De Blasiis E, Quattrini FM, Pisicchio C, Guerra E, et al. Prevalence and Clinical Significance of Aortic Root Dilation in Highly Trained Competitive Athletes. *Circulation*. 17 août 2010;122(7):698-706.
96. D'Andrea A, Cocchia R, Riegler L, Salerno G, Scarafile R, Citro R, et al. Aortic stiffness and distensibility in top-level athletes. *J Am Soc Echocardiogr Off Publ Am Soc Echocardiogr*. mai 2012;25(5):561-7.
97. Churchill TW, Groezinger E, Kim JH, Loomer G, Guseh JS, Wasfy MM, et al. Association of Ascending Aortic Dilatation and Long-term Endurance Exercise Among Older Masters-Level Athletes. *JAMA Cardiol*. 26 févr 2020;
98. Kinoshita N, Mimura J, Obayashi C, Katsukawa F, Onishi S, Yamazaki H. Aortic root dilatation among young competitive athletes: echocardiographic screening of 1929 athletes between 15 and 34 years of age. *Am Heart J*. avr 2000;139(4):723-8.
99. Gati S, Malhotra A, Sedgwick C, Papamichael N, Dhutia H, Sharma R, et al. Prevalence and progression of aortic root dilatation in highly trained young athletes. *Heart*. 25 mars 2019;heartjnl-2018-314288.
100. Mayerick C, Carré F, Eleftheriades J. Aortic dissection and sport: physiologic and clinical understanding provide an opportunity to save young lives. *J Cardiovasc Surg (Torino)*. oct 2010;51(5):669-81.

101. Jacques V, Guerci P, Vial F, Abel F, Bouaziz H. Dissection de l'aorte descendante et prééclampsie à 30 semaines d'aménorrhée : prise en charge médicale et césarienne. *Ann Fr Anesth Réanimation*. 1 janv 2012;31(1):67-71.
102. Carré F. Adaptations cardiovasculaires et respiratoires au cours de l'exercice. In: *Cardiologie du Sport*. Masson. Paris: Amoretti R, Brion R et Club des Cardiologues du Sport; 2000. p. 16-22.
103. Green DJ, Spence A, Rowley N, Thijssen DHJ, Naylor LH. Vascular adaptation in athletes: is there an « athlete's artery »? *Exp Physiol*. mars 2012;97(3):295-304.
104. Aubry A, Hausswirth C, Louis J, Coutts AJ, Buchheit M, Le Meur Y. The Development of Functional Overreaching Is Associated with a Faster Heart Rate Recovery in Endurance Athletes. *PLoS ONE* [Internet]. 21 oct 2015 [cité 11 août 2020];10(10). Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4619310/>
105. Nomenclatures des professions et catégories socioprofessionnelles | Insee [Internet]. [cité 5 avr 2021]. Disponible sur: <https://www.insee.fr/fr/information/2406153>
106. McClean G, Riding NR, Ardern CL, Farooq A, Pieles GE, Watt V, et al. Electrical and structural adaptations of the paediatric athlete's heart: a systematic review with meta-analysis. *Br J Sports Med*. 31 mars 2017;
107. Duren CM, Cress ME, McCully KK. The influence of physical activity and yoga on central arterial stiffness. *Dyn Med DM*. 28 janv 2008;7:2.
108. Ainsworth BE, Haskell WL, Leon AS, Jacobs DR, Montoye HJ, Sallis JF, et al. Compendium of Physical Activities: classification of energy costs of human physical activities. *Med Sci Sports Exerc*. janv 1993;25(1):71-80.
109. Ainsworth BE, Haskell WL, Whitt MC, Irwin ML, Swartz AM, Strath SJ, et al. Compendium of Physical Activities: an update of activity codes and MET intensities: *Med Sci Sports Exerc*. sept 2000;32(Supplement):S498-516.
110. Foster C, Florhaug JA, Franklin J, Gottschall L, Hrovatin LA, Parker S, et al. A new approach to monitoring exercise training. *J Strength Cond Res*. févr 2001;15(1):109-15.
111. Mujika I. Quantification of Training and Competition Loads in Endurance Sports: Methods and Applications. *Int J Sports Physiol Perform*. 5 déc 2016;1-25.
112. Arazi H, Asadi A, Khalkhali F, Boullosa D, Hackney AC, Granacher U, et al. Association Between the Acute to Chronic Workload Ratio and Injury Occurrence in Young Male Team Soccer Players: A Preliminary Study. *Front Physiol*. 2020;11:608.
113. Foster C. Monitoring training in athletes with reference to overtraining syndrome. *Med Sci Sports Exerc*. juill 1998;30(7):1164-8.
114. NASE. Load, monotony and strain [Internet]. 2014 [cité 6 juin 2017]. Disponible sur: www.naseinc.com/blog/load-monotony-and-strain
115. Larousse É. Encyclopédie Larousse en ligne - tonométrie [Internet]. [cité 11 août 2020]. Disponible sur: <https://www.larousse.fr/encyclopedie/medical/tonométrie/16614>

116. Chemla D, Lamia B. Monitoring hémodynamique non-invasif en réanimation : intérêt potentiel de la tonométrie artérielle. *Réanimation*. avr 2009;18(3):197-200.
117. Ring M, Eriksson MJ, Zierath JR, Caidahl K. Arterial stiffness estimation in healthy subjects: a validation of oscillometric (Arteriograph) and tonometric (SphygmoCor) techniques. *Hypertens Res*. nov 2014;37(11):999-1007.
118. Ding F-H, Li Y, Zhang R-Y, Zhang Q, Wang J-G. Comparison of the SphygmoCor and Omron devices in the estimation of pressure amplification against the invasive catheter measurement. *J Hypertens*. janv 2013;31(1):86-93.
119. O'Rourke MF, Adji A. An updated clinical primer on large artery mechanics: implications of pulse waveform analysis and arterial tonometry. *Curr Opin Cardiol*. juill 2005;20(4):275-81.
120. Pauca AL, O'Rourke MF, Kon ND. Prospective evaluation of a method for estimating ascending aortic pressure from the radial artery pressure waveform. *Hypertens Dallas Tex* 1979. oct 2001;38(4):932-7.
121. SphygmoCor Platform [Internet]. ATCOR. [cité 7 juill 2021]. Disponible sur: <https://atcormedical.com/technology/sphygmocor/>
122. Butlin M, Qasem A. Large Artery Stiffness Assessment Using SphygmoCor Technology. *Pulse Basel Switz*. janv 2017;4(4):180-92.
123. Courand P, Lantelme P. Mesure de la pression centrale : y a-t-il un intérêt en pratique ? *Réal Cardiol*. oct 2012;(289):28-31.
124. Salvi P, Lio G, Labat C, Ricci E, Pannier B, Benetos A. Validation of a new non-invasive portable tonometer for determining arterial pressure wave and pulse wave velocity: the PulsePen device. *J Hypertens*. déc 2004;22(12):2285-93.
125. Joly L, Perret-Guillaume C, Nzietchueng R, Lacolley P, Benetos A. Arterial aging: Determinants and clinical impact. *Med Ther - Cardio*. 1 mai 2008;4:220-8.
126. Salvi P, Magnani E, Valbusa F, Agnoletti D, Alecu C, Joly L, et al. Comparative study of methodologies for pulse wave velocity estimation. *J Hum Hypertens*. oct 2008;22(10):669-77.
127. DiaTecne s.r.l./References/Tonometry [Internet]. [cité 11 août 2020]. Disponible sur: <https://www.pulsepen.com/tonometry.html>
128. Kastler B, Vetter D. Comprendre l'IRM: manuel d'auto-apprentissage [Internet]. 2011 [cité 20 sept 2020]. Disponible sur: <http://www.sciencedirect.com/science/book/9782294710445>
129. Taylor AJ, Salerno M, Dharmakumar R, Jerosch-Herold M. T1 Mapping: Basic Techniques and Clinical Applications. *JACC Cardiovasc Imaging*. 1 janv 2016;9(1):67-81.
130. Messroghli DR, Radjenovic A, Kozerke S, Higgins DM, Sivananthan MU, Ridgway JP. Modified Look-Locker inversion recovery (MOLLI) for high-resolution T1 mapping of the heart. *Magn Reson Med*. juill 2004;52(1):141-6.
131. Dyverfeldt P, Bissell M, Barker AJ, Bolger AF, Carlhäll C-J, Ebbers T, et al. 4D flow cardiovascular magnetic resonance consensus statement. *J Cardiovasc Magn Reson Off J Soc Cardiovasc Magn Reson*. 10 août 2015;17:72.

132. Chai P, Mohiaddin R. How we perform cardiovascular magnetic resonance flow assessment using phase-contrast velocity mapping. *J Cardiovasc Magn Reson Off J Soc Cardiovasc Magn Reson*. 2005;7(4):705-16.
133. Hope MD, Hope TA, Crook SES, Ordovas KG, Urbaniak TH, Alley MT, et al. 4D flow CMR in assessment of valve-related ascending aortic disease. *JACC Cardiovasc Imaging*. juill 2011;4(7):781-7.
134. Meierhofer C, Schneider EP, Lyko C, Hutter A, Martinoff S, Markl M, et al. Wall shear stress and flow patterns in the ascending aorta in patients with bicuspid aortic valves differ significantly from tricuspid aortic valves: a prospective study. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*. août 2013;14(8):797-804.
135. Köhler B, Preim U, Grothoff M, Gutberlet M, Fischbach K, Preim B. Motion-aware stroke volume quantification in 4D PC-MRI data of the human aorta. *Int J Comput Assist Radiol Surg*. févr 2016;11(2):169-79.
136. van der Geest RJ, Garg P. Advanced Analysis Techniques for Intra-cardiac Flow Evaluation from 4D Flow MRI. *Curr Radiol Rep*. 2016;4:38.
137. Crandon S, Elbaz MSM, Westenberg JJM, van der Geest RJ, Plein S, Garg P. Clinical applications of intra-cardiac four-dimensional flow cardiovascular magnetic resonance: A systematic review. *Int J Cardiol*. 15 déc 2017;249:486-93.
138. Houriez-Gombaudo-Saintonge S, Mousseaux E, Bargiotas I, De Cesare A, Diertenbeck T, Bouaou K, et al. Comparison of different methods for the estimation of aortic pulse wave velocity from 4D flow cardiovascular magnetic resonance. *J Cardiovasc Magn Reson Off J Soc Cardiovasc Magn Reson*. 12 2019;21(1):75.
139. Sierra-Galan LM, François CJ. Clinical Applications of MRA 4D-Flow. *Curr Treat Options Cardiovasc Med*. 10 sept 2019;21(10):58.
140. Neuhaus E, Weiss K, Bastkowski R, Koopmann J, Maintz D, Giese D. Accelerated aortic 4D flow cardiovascular magnetic resonance using compressed sensing: applicability, validation and clinical integration. *J Cardiovasc Magn Reson Off J Soc Cardiovasc Magn Reson*. 21 2019;21(1):65.
141. Kramer CM, Barkhausen J, Bucciarelli-Ducci C, Flamm SD, Kim RJ, Nagel E. Standardized cardiovascular magnetic resonance imaging (CMR) protocols: 2020 update. *J Cardiovasc Magn Reson* [Internet]. 24 févr 2020 [cité 20 sept 2020];22. Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7038611/>
142. Méthodes de synchronisation cardiaque (gating cardiaque) en IRM [Internet]. IMAIOS. [cité 27 sept 2020]. Disponible sur: <https://www.imaios.com/fr/e-Cours/e-MRI/IRM-cardiaque/synchronisation-cardiaque>
143. Otsuki T, Maeda S, Iemitsu M, Saito Y, Tanimura Y, Ajisaka R, et al. Systemic arterial compliance, systemic vascular resistance, and effective arterial elastance during exercise in endurance-trained men. *Am J Physiol-Regul Integr Comp Physiol*. juill 2008;295(1):R228-35.
144. Aubry A, Hausswirth C, Louis J, Coutts AJ, LE Meur Y. Functional overreaching: the key to peak performance during the taper? *Med Sci Sports Exerc*. sept 2014;46(9):1769-77.

145. Keenan NG, Pennell DJ. CMR of ventricular function. *Echocardiogr Mt Kisco N.* févr 2007;24(2):185-93.
146. Di Leo G, D'Angelo ID, Ali M, Cannaò PM, Mauri G, Secchi F, et al. Intra- and inter-reader reproducibility of blood flow measurements on the ascending aorta and pulmonary artery using cardiac magnetic resonance. *Radiol Med (Torino).* mars 2017;122(3):179-85.
147. Arnold JR, McCann GP. Cardiovascular magnetic resonance: applications and practical considerations for the general cardiologist. *Heart.* 1 févr 2020;106(3):174-81.
148. Parati G, Stergiou GS, Dolan E, Bilo G. Blood pressure variability: clinical relevance and application. *J Clin Hypertens Greenwich Conn.* juill 2018;20(7):1133-7.
149. D'Ascenzi F, Pelliccia A, Valentini F, Malandrino A, Natali BM, Barbati R, et al. Training-induced right ventricular remodelling in pre-adolescent endurance athletes: The athlete's heart in children. *Int J Cardiol.* 27 janv 2017;
150. Dencker M, Thorsson O, Karlsson MK, Lindén C, Wollmer P, Andersen LB. Objectively measured daily physical activity related to cardiac size in young children. *Scand J Med Sci Sports.* oct 2009;19(5):664-8.
151. Eijsvogels TM, Thompson PD. Are There Clinical Cardiac Complications From Too Much Exercise? *Curr Sports Med Rep.* févr 2017;16(1):9-11.
152. Eijsvogels TMH, Molossi S, Lee D-C, Emery MS, Thompson PD. Exercise at the Extremes: The Amount of Exercise to Reduce Cardiovascular Events. *J Am Coll Cardiol.* 26 janv 2016;67(3):316-29.
153. Burma JS, Copeland PV, Macaulay A, Khatra O, Smirl JD. Effects of high-intensity intervals and moderate-intensity exercise on baroreceptor sensitivity and heart rate variability during recovery. *Appl Physiol Nutr Metab Physiol Appl Nutr Metab.* oct 2020;45(10):1156-64.
154. Gillinov S, Etiwy M, Wang R, Blackburn G, Phelan D, Gillinov AM, et al. Variable Accuracy of Wearable Heart Rate Monitors during Aerobic Exercise. *Med Sci Sports Exerc.* août 2017;49(8):1697-703.
155. Foster C, Rodriguez-Marroyo JA, de Koning JJ. Monitoring Training Loads: The Past, the Present, and the Future. *Int J Sports Physiol Perform.* avr 2017;12(Suppl 2):S22-8.
156. Rodríguez-Marroyo JA, Villa G, García-López J, Foster C. Comparison of heart rate and session rating of perceived exertion methods of defining exercise load in cyclists. *J Strength Cond Res.* août 2012;26(8):2249-57.
157. Mølmen KS, Øfsteng SJ, Rønnestad BR. Block periodization of endurance training - a systematic review and meta-analysis. *Open Access J Sports Med.* 2019;10:145-60.
158. Etxebarria N, Mujika I, Pyne DB. Training and Competition Readiness in Triathlon. *Sports Basel Switz.* 29 avr 2019;7(5):E101.
159. Stevens SL, Wood S, Koshiaris C, Law K, Glasziou P, Stevens RJ, et al. Blood pressure variability and cardiovascular disease: systematic review and meta-analysis. *BMJ.* 9 août 2016;354:i4098.

160. Gepts T, Nguyen AM, Cleland C, Wu W, Pham-Singer H, Shelley D. Accounting for Blood Pressure Seasonality Alters Evaluation of Practice-Level Blood Pressure Control Intervention. *Am J Hypertens*. 13 mars 2020;33(3):220-2.
161. Munakata M. Clinical significance of stress-related increase in blood pressure: current evidence in office and out-of-office settings. *Hypertens Res Off J Jpn Soc Hypertens*. août 2018;41(8):553-69.
162. Eşer I, Khorshid L, Güneş UY, Demir Y. The effect of different body positions on blood pressure. *J Clin Nurs*. janv 2007;16(1):137-40.
163. Namasivayam M, Adji A, Lin L, Hayward CS, Feneley MP, O'Rourke MF, et al. Non-Invasive Quantification of Ventricular Contractility, Arterial Elastic Function and Ventriculo-Arterial Coupling from a Single Diagnostic Encounter Using Simultaneous Arterial Tonometry and Magnetic Resonance Imaging. *Cardiovasc Eng Technol*. juin 2020;11(3):283-94.
164. Bulas J, Potocarova M, Kupcova V, Gaspar L, Wimmer G, Murin J. Central systolic blood pressure increases with aortic stiffness. *Bratisl Lek Listy*. 2019;120(12):894-8.
165. Petersen SE, Khanji MY, Plein S, Lancellotti P, Bucciarelli-Ducci C. European Association of Cardiovascular Imaging expert consensus paper: a comprehensive review of cardiovascular magnetic resonance normal values of cardiac chamber size and aortic root in adults and recommendations for grading severity. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*. 1 déc 2019;20(12):1321-31.
166. Tanaka H, Dinunno FA, Monahan KD, Clevenger CM, DeSouza CA, Seals DR. Aging, habitual exercise, and dynamic arterial compliance. *Circulation*. 12 sept 2000;102(11):1270-5.
167. Saeed S, Saeed N, Grigoryan K, Chowienczyk P, Chambers JB, Rajani R. Determinants and clinical significance of aortic stiffness in patients with moderate or severe aortic stenosis. *Int J Cardiol*. 15 sept 2020;315:99-104.
168. Ji H, Xiong J, Yu S, Chi C, Bai B, Teliewubai J, et al. Measuring the Carotid to Femoral Pulse Wave Velocity (Cf-PWV) to Evaluate Arterial Stiffness. *J Vis Exp JoVE*. 3 mai 2018;(135).
169. Hasegawa N, Fujie S, Horii N, Miyamoto-Mikami E, Tsuji K, Uchida M, et al. Effects of Different Exercise Modes on Arterial Stiffness and Nitric Oxide Synthesis. *Med Sci Sports Exerc*. juin 2018;50(6):1177-85.
170. Ma Y, Choi J, Hourlier-Fargette A, Xue Y, Chung HU, Lee JY, et al. Relation between blood pressure and pulse wave velocity for human arteries. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 30 oct 2018;115(44):11144-9.
171. Tordi N, Colin E, Mourot L, Bouhaddi M, Regnard J, Laurant P. Effects of resuming endurance training on arterial stiffness and nitric oxide production during exercise in elite cyclists. *Appl Physiol Nutr Metab Physiol Appl Nutr Metab*. juin 2006;31(3):244-9.
172. Papaioannou TG, Protogerou AD, Argyris A, Aissopou E, Georgiopoulos G, Nasothimiou E, et al. Total arterial compliance, estimated by a novel method, is better related to left ventricular mass compared to aortic pulse wave velocity: The SAFAR study. *Clin Exp Hypertens N Y N* 1993. 2017;39(3):271-6.

173. Cornelissen VA, Fagard RH. Effects of endurance training on blood pressure, blood pressure-regulating mechanisms, and cardiovascular risk factors. *Hypertens Dallas Tex* 1979. oct 2005;46(4):667-75.
174. Piras A, Cortesi M, Campa F, Perazzolo M, Gatta G. Recovery Time Profiling After Short-, Middle- and Long-Distance Swimming Performance. *J Strength Cond Res.* mai 2019;33(5):1408-15.
175. Tarumi T, Yamabe T, Fukuie M, Kimura R, Zhu DC, Ohyama-Byun K, et al. Proximal Aortic Compliance in Young Male Endurance Athletes: An MRI Study. *Med Sci Sports Exerc.* 1 mars 2021;53(3):543-50.
176. D'Ascenzi F, Anselmi F, Piu P, Fiorentini C, Carbone SF, Volterrani L, et al. Cardiac Magnetic Resonance Normal Reference Values of Biventricular Size and Function in Male Athlete's Heart. *JACC Cardiovasc Imaging.* sept 2019;12(9):1755-65.
177. Petersen SE, Aung N, Sanghvi MM, Zemrak F, Fung K, Paiva JM, et al. Reference ranges for cardiac structure and function using cardiovascular magnetic resonance (CMR) in Caucasians from the UK Biobank population cohort. *J Cardiovasc Magn Reson Off J Soc Cardiovasc Magn Reson.* 3 févr 2017;19(1):18.
178. Dawkins TG, Shave RE, Baggish AL, Drane AL, Parisi EJ, Roberts MG, et al. Electrocardiographic changes following six months of long-distance triathlon training in previously recreationally active individuals. *Eur J Sport Sci.* mai 2020;20(4):553-62.
179. Carré F. [Athlete's heart or hypertrophic cardiomyopathy?]. *Presse Medicale Paris Fr* 1983. juin 2012;41(6 Pt 1):608-12.
180. Pedlar CR, Brown MG, Shave RE, Otto JM, Drane A, Michaud-Finch J, et al. Cardiovascular response to prescribed detraining among recreational athletes. *J Appl Physiol Bethesda Md* 1985. 01 2018;124(4):813-20.
181. Rosmini S, Bulluck H, Abdel-Gadir A, Treibel TA, Culotta V, Thompson R, et al. The Effect of Blood Composition on T1 Mapping. *JACC Cardiovasc Imaging.* sept 2019;12(9):1888-90.
182. Leicht AS, Allen GD, Hoey AJ. Influence of intensive cycling training on heart rate variability during rest and exercise. *Can J Appl Physiol Rev Can Physiol Appl.* déc 2003;28(6):898-909.
183. Kemi OJ, Wisloff U. High-intensity aerobic exercise training improves the heart in health and disease. *J Cardiopulm Rehabil Prev.* févr 2010;30(1):2-11.
184. D'Andrea A, Formisano T, Riegler L, Scarafile R, America R, Martone F, et al. Acute and Chronic Response to Exercise in Athletes: The « Supernormal Heart ». *Adv Exp Med Biol.* 2017;999:21-41.
185. Caselli S, Di Pietro R, Di Paolo FM, Picicchio C, di Giacinto B, Guerra E, et al. Left ventricular systolic performance is improved in elite athletes. *Eur J Echocardiogr J Work Group Echocardiogr Eur Soc Cardiol.* juill 2011;12(7):514-9.
186. Walley KR. Left ventricular function: time-varying elastance and left ventricular aortic coupling. *Crit Care Lond Engl.* 10 sept 2016;20:270.

187. Burkhoff D, Sagawa K. Ventricular efficiency predicted by an analytical model. *Am J Physiol.* juin 1986;250(6 Pt 2):R1021-1027.
188. Kasikcioglu E, Kayserilioglu A, Oflaz H, Akhan H. Aortic distensibility and left ventricular diastolic functions in endurance athletes. *Int J Sports Med.* avr 2005;26(3):165-70.
189. Fahs CA, Rossow LM, Yan H, Ranadive SM, Agiovlasis S, Wilund KR, et al. Resting and post exercise arterial-ventricular coupling in endurance-trained men and women. *J Hum Hypertens.* sept 2013;27(9):552-6.
190. Cote AT, Bredin SSD, Phillips AA, Koehle MS, Glier MB, Devlin AM, et al. Left ventricular mechanics and arterial-ventricular coupling following high-intensity interval exercise. *J Appl Physiol Bethesda Md* 1985. déc 2013;115(11):1705-13.
191. Vitiello D, Palacin F, Poinard L, Kirsch M, Jouini S, Billat V. Marathon-Induced Cardiac Fatigue: A Review over the Last Decade for the Preservation of the Athletes' Health. *Int J Environ Res Public Health.* 17 août 2021;18(16):8676.
192. Birat A, Bourdier P, Dodu A, Grosseuvre C, Blazeovich AJ, Amiot V, et al. Effect of Long-Duration Adventure Races on Cardiac Damage Biomarker Release and Muscular Function in Young Athletes. *Front Physiol [Internet].* 5 févr 2020 [cité 24 mai 2020];11. Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7012902/>
193. Milan A, Zocaro G, Leone D, Tosello F, Buraioli I, Schiavone D, et al. Current assessment of pulse wave velocity: comprehensive review of validation studies. *J Hypertens.* 2019;37(8):1547-57.
194. Yim ES, Basilico F, Corrado G. Early screening for cardiovascular abnormalities with preparticipation echocardiography: utility of focused physician-operated echocardiography in preparticipation screening of athletes. *J Ultrasound Med Off J Am Inst Ultrasound Med.* févr 2014;33(2):307-13.
195. Green DJ, Hopman MTE, Padilla J, Laughlin MH, Thijssen DHJ. Vascular Adaptation to Exercise in Humans: Role of Hemodynamic Stimuli. *Physiol Rev.* 2017;97(2):495-528.
196. Maiorana A, O'Driscoll G, Taylor R, Green D. Exercise and the nitric oxide vasodilator system. *Sports Med Auckl NZ.* 2003;33(14):1013-35.
197. Thijssen DHJ, Cable NT, Green DJ. Impact of exercise training on arterial wall thickness in humans. *Clin Sci Lond Engl* 1979. avr 2012;122(7):311-22.
198. Rouvière O, Feugier P, Gutiérrez JP, Chevalier J-M. Arterial endofibrosis in endurance athletes: angiographic features and classification. *Radiology.* oct 2014;273(1):294-303.
199. Menon D, Onida S, Davies AH. Overview of arterial pathology related to repetitive trauma in athletes. *J Vasc Surg.* août 2019;70(2):641-50.
200. Haynes A, Linden MD, Robey E, Watts GF, Barrett PHR, Naylor LH, et al. Acute Impact of Different Exercise Modalities on Arterial and Platelet Function. *Med Sci Sports Exerc.* avr 2018;50(4):785-91.

201. Naylor LH, Spence AL, Donker SCM, Thijssen DHJ, Green DJ. Is there an athlete's artery? A comparison of brachial and femoral artery structure and function in male strength, power and endurance athletes. *J Sci Med Sport*. juill 2021;24(7):635-40.
202. Mihal C, Dassen WRM, Kuipers H. Cardiac remodelling: concentric versus eccentric hypertrophy in strength and endurance athletes. *Neth Heart J Mon J Neth Soc Cardiol Neth Heart Found*. avr 2008;16(4):129-33.
203. Galanti G, Stefani L, Mascherini G, Di Tante V, Toncelli L. Left ventricular remodeling and the athlete's heart, irrespective of quality load training. *Cardiovasc Ultrasound*. 17 nov 2016;14(1):46.
204. Luthi P, Zuber M, Ritter M, Oechslin EN, Jenni R, Seifert B, et al. Echocardiographic findings in former professional cyclists after long-term deconditioning of more than 30 years. *Eur J Echocardiogr J Work Group Echocardiogr Eur Soc Cardiol*. mars 2008;9(2):261-7.
205. Hulshof HG, van Dijk AP, Hopman MTE, van der Sluijs CF, George KP, Oxborough DL, et al. Acute impact of changes to hemodynamic load on the left ventricular strain-volume relationship in young and older men. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*. 1 avr 2020;318(4):R743-50.
206. Carré F. [News in sport's cardiology: too much sport harmful for the heart?]. *Presse Medicale Paris Fr* 1983. août 2015;44(7-8):812-20.
207. Tso J, Kim JH. Master Endurance Athletes and Cardiovascular Controversies. *Curr Sports Med Rep*. mars 2020;19(3):113-8.

Analyse de l'entraînement et des conséquences fonctionnelles du remodelage cardio-vasculaire étudié en IRM chez le triathlète amateur longue distance

Le triathlon est un sport d'endurance en pleine expansion, connu pour son importante sollicitation cardio-vasculaire. Ce travail porte sur l'impact que peut avoir la pratique du triathlon longue distance (half-ironman et plus) sur le système cardio-vasculaire. Cette rédaction propose une étude descriptive de l'entraînement des triathlètes puis une analyse des variations de la compliance aortique et du remodelage cardiaque mesurés grâce à l'IRM cardio-vasculaire au cours de la saison sportive. 34 triathlètes (Tri) de sexe masculin pratiquant le triathlon longue distance et âgés de 19 à 39 ans ont été inclus, ainsi que 29 volontaires sains appariés sur le sexe et l'âge, et insuffisamment actifs (Ctrl) selon les recommandations de l'Organisation Mondiale de la Santé. Les triathlètes ont fourni leurs données d'entraînement via un agenda dédié. Tous les volontaires ont réalisé trois visites (V1, V2, V3) réparties au cours de la saison sportive. Chaque visite comprenait une tonométrie d'aplanation ainsi qu'une IRM cardio-vasculaire. Cet examen d'imagerie a permis entre autres de mesurer les sections aortiques et les volumes ventriculaires droits et gauches. Pour l'année 2018, les triathlètes ont déclaré s'entraîner en moyenne $10,5 \pm 2,4$ heures par semaine. Au cours des six mois d'entraînement qui ont précédé la course de référence, les paramètres hebdomadaires moyens d'entraînement sont les suivants : *training load* = 3244 ± 2225 ; *monotony* = $1,14 \pm 0,44$; *strain* = 4070 ± 4252 ; *fitness* = -3610 ± 3967 . La compliance de l'aorte ascendante calculée avec la pression pulsée périphérique était significativement plus élevée dans le groupe Tri à V2 ($3,85 \pm 1,19 \cdot 10^{-2}$ vs $3,25 \pm 0,88 \cdot 10^{-2}$ cm²/mmHg ; $p = 0,032$) et à V3 ($3,85 \pm 1,09 \cdot 10^{-2}$ vs $3,25 \pm 0,92 \cdot 10^{-2}$ cm²/mmHg ; $p = 0,027$), sans variation longitudinale au cours de la saison sportive ($p = 0,465$). La majorité des volumes ventriculaires gauches et droits étaient significativement plus élevés dans le groupe Tri et pour les trois visites, mais sans variation longitudinale significative. Ces résultats sont en faveur de l'existence d'adaptations cardiaques stables dans le temps mais d'apparition ancienne. Elles sont liées à la pratique régulière et suffisamment soutenue d'un sport d'endurance comme le triathlon, et peuvent s'apparenter à la notion de cœur d'athlète. Des adaptations vasculaires sont également suggérées par ces résultats, qui pourraient contribuer au concept émergent d'artère d'athlète. Des études longitudinales complémentaires seraient utiles pour évaluer la dynamique de ce remodelage cardio-vasculaire à l'échelle d'une vie d'athlète ainsi que ses conséquences physiopathologiques éventuelles.

MOTS-CLES : compliance aortique, IRM cardiovasculaire, cœur d'athlète, couplage ventriculo-aortique, entraînement

Analysis of training and functional consequences of cardiovascular remodeling studied by MRI in amateur long-distance triathletes

Triathlon is a fast-growing endurance sport known for its high cardiovascular demand. This paper focuses on the impact that long distance triathlon (half-ironman and above) can have on the cardiovascular system. This writing proposes a descriptive study of the triathletes' training and then an analysis of variations in aortic compliance and cardiac remodeling measured by cardiovascular MRI during the race season. Thirty-four 19-39-year-old male long-distance triathletes (Tri) were included, as well as twenty-nine healthy sex- and age-matched volunteers who were insufficiently active (Ctrl) according to World Health Organization recommendations. Triathletes provided their training data through a dedicated diary. All volunteers completed three visits (V1, V2, V3) spread over the course of the race season. Each visit included an applanation tonometry and a cardiovascular MRI. This imaging modality allowed the measurement of aortic sections and right and left ventricular volumes. For the year 2018, triathletes reported training on average 10.5 ± 2.4 hours per week. During the six months prior to the reference race, the average weekly training parameters were: training load = 3244 ± 2225 ; monotony = 1.14 ± 0.44 ; strain = 4070 ± 4252 ; fitness = -3610 ± 3967 . The compliance of the ascending aorta calculated with peripheral pulse pressure was significantly higher in the Tri group at V2 ($3.85 \pm 1.19 \cdot 10^{-2}$ vs. $3.25 \pm 0.88 \cdot 10^{-2}$ cm²/mmHg; $p = 0.032$) and at V3 ($3.85 \pm 1.09 \cdot 10^{-2}$ vs. $3.25 \pm 0.92 \cdot 10^{-2}$ cm²/mmHg; $p = 0.027$), with no longitudinal variation during the race season ($p = 0.465$). The majority of left and right ventricular volumes were significantly higher in the Tri group and for all three visits, but without significant longitudinal variation. These results are in favour of the existence of stable but long-standing cardiac adaptations. They are linked to regular and sufficiently sustained practice of an endurance sport such as triathlon and may be related to the notion of athlete's heart. Vascular adaptations are also suggested by these results, which may contribute to the emerging concept of the athlete's artery. Further longitudinal studies would be useful to assess the dynamics of this cardiovascular remodeling over an athlete's lifetime and its possible pathophysiological consequences.

KEYWORDS: aortic compliance, cardiovascular MRI, athlete's heart, ventriculo-aortic coupling, training