



**HAL**  
open science

# Le calcul du travail myocardique a-t-il un intérêt chez l'athlète ?

Clémentine Balayn

► **To cite this version:**

Clémentine Balayn. Le calcul du travail myocardique a-t-il un intérêt chez l'athlète?. Médecine humaine et pathologie. 2023. dumas-04566587

**HAL Id: dumas-04566587**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04566587>**

Submitted on 2 May 2024

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

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

## AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance.

La propriété intellectuelle du document reste entièrement celle du ou des auteurs. Les utilisateurs doivent respecter le droit d'auteur selon la législation en vigueur, et sont soumis aux règles habituelles du bon usage, comme pour les publications sur papier : respect des travaux originaux, citation, interdiction du pillage intellectuel, etc.

Il est mis à disposition de toute personne intéressée par l'intermédiaire de [l'archive ouverte DUMAS](#) (Dépôt Universitaire de Mémoires Après Soutenance).

Si vous désirez contacter son ou ses auteurs, nous vous invitons à consulter en ligne les annuaires de l'ordre des médecins, des pharmaciens et des sages-femmes.

Contact à la Bibliothèque universitaire de Médecine Pharmacie de Grenoble :

[bump-theses@univ-grenoble-alpes.fr](mailto:bump-theses@univ-grenoble-alpes.fr)

Année : 2023

**LE CALCUL DU TRAVAIL MYOCARDIQUE A-T-IL UN INTÉRÊT  
CHEZ L'ATHLÈTE ?**

THÈSE

POUR LE DIPLÔME D'ÉTAT DE DOCTEUR EN MÉDECINE

SPÉCIALITÉ : MÉDECINE CARDIOVASCULAIRE

SOUTENUE PUBLIQUEMENT À LA FACULTÉ DE MÉDECINE DE GRENOBLE

Le 03/10/2023

Par Mme Clémentine BALAYN

*[Données à caractère personnel]*

DEVANT LE JURY COMPOSÉ DE :

Président du jury :

M. le Pr Gérald VANZETTO

Membres :

M. le Dr Stéphane DOUTRELEAU (directeur de thèse)

M. le Dr Benoît CHAMPIGNEULLE (co-directeur de thèse)

M. le Dr Loïc Edmond BELLE

Mme le Dr Océane BOUCHOT

*L'UFR de Médecine de Grenoble n'entend donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans les thèses ; ces opinions sont considérées comme propres à leurs auteurs*

CORPS	NOM Prénom	DISCIPLINE UNIVERSITAIRE
PU-PH	ALBALADEJO Pierre	Anesthésiologie-réanimation et médecine péri-opératoire
PU-PH	ARVIEUX-BARTHÉLÉMY Catherine	Chirurgie viscérale et digestive
PU-PH	BAILLET Athan	Rhumatologie
PU-PH	BARONE-ROCHETTE Gilles	Cardiologie
PU-PH	BAYAT Sam	Physiologie
MCF Ass.MG	BENDAMENE Farouk	Médecine Générale
PU-PH	BENHAMOU Pierre-Yves	Endocrinologie, diabète et maladies métaboliques
PU-PH	BERGER François	Biologie cellulaire
MCU-PH	BÉTRY Cécile	Nutrition
MCU-PH	BIDART-COUTTON Marie	Biologie cellulaire
PU-PH	BIOLAC-ROGIER Stéphanie	Pédopsychiatrie ; addictologie
PU-PH	BLAISE Sophie	Chirurgie vasculaire ; médecine vasculaire
PR Ass. Méd.	BOILLOT Bernard	Urologie
MCU-PH	BOISSET Sandrine	Bactériologie-virologie ; Hygiène hospitalière
PU-PH	BONAZ Bruno	Gastroentérologie ; hépatologie
PU-PH	BONNETERRE Vincent	Médecine et santé au travail
PU-PH	BOREL Anne-Laure	Nutrition
PU-PH	BOSSON Jean-Luc	Biostatistiques, informatique médicale et technologies de communication
MCU-PH	BOTTARI Serge	Biologie cellulaire
PR Ass.MG	BOUCHAUD Jacques	Médecine Générale
PU-PH	BOUGEROL Thierry	Psychiatrie d'adultes
PU-PH	BOUILLET Laurence	Médecine interne ; gériatrie et biologie du vieillissement ; addictologie
MCU-PH	BOUSSAT Bastien	Épidémiologie, économie de la santé et prévention
PU-PH	BOUZAT Pierre	Anesthésiologie-réanimation et médecine péri-opératoire
PU-PH émérite	BRAMBILLA Christian	Pneumologie
PU-PH émérite	BRAMBILLA Elisabeth	Anatomie et cytologie pathologiques
MCU-PH	BRENIER-PINCHART Marie Pierre	Parasitologie et mycologie
PU-PH	BRICAULT Ivan	Radiologie et imagerie médicale
PU-PH	BRICHON Pierre-Yves	Chirurgie thoracique et cardiovasculaire
MCU-PH	BRIOT Raphaël	Thérapeutique-médecine de la douleur ; Addictologie
PU-PH émérite	CAHN Jean-Yves	Hématologie
PU-PH émérite	CARPENTIER Patrick	Chirurgie vasculaire, médecine vasculaire
PR Ass.MG	CARRILLO Yannick	Médecine Générale
MCU-PH	CASPAR Yvan	Bactériologie-virologie ; hygiène hospitalière
PU-PH émérite	CESBRON Jean-Yves	Immunologie
PU-PH	CHABARDÈS Stephan	Neurochirurgie
PU-PH	CHABRE Olivier	Endocrinologie, diabète et maladies métaboliques
PU-PH	CHAFFANJON Philippe	Anatomie
MCF Ass.MG	CHAMBOREDON Benoît	Médecine Générale



CORPS	NOM Prénom	DISCIPLINE UNIVERSITAIRE
PU-PH	CHARLES Julie	Dermato-vénérologie
MCF Ass.MG	CHAUVET Marion	Médecine Générale
PU-PH	CHAVANON Olivier	Chirurgie thoracique et cardiovasculaire
MCU-PH	CHEVALLIER Marie	Pédiatrie
PU-PH	CHIQUET Christophe	Ophthalmologie
PU-PH	CHIRICA Mircea	Chirurgie viscérale et digestive
PU-PH	CINQUIN Philippe	Biostatistiques, informatique médicale et technologies de communication
MCU-PH	CLAVARINO Giovanna	Immunologie
MCU-PH	CLIN CHERPEC Rita	Nutrition
PU-PH	COHEN Olivier	Histologie, embryologie et cytogénétique
PU-PH	COURVOISIER Aurélien	Chirurgie infantile
PU-PH	COUTTON Charles	Génétique
PU-PH	COUTURIER Pascal	Médecine interne ; gériatrie et biologie du vieillissement ; addictologie
PU-PH	CRACOWSKI Jean-Luc	Pharmacologie fondamentale ; pharmacologie clinique ; addictologie
PU-PH	DEBATY Guillaume	Médecine d'Urgence
PU-PH	DEBILLON Thierry	Pédiatrie
PU-PH	DECAENS Thomas	Gastroentérologie ; hépatologie ; addictologie
PR Ass. Méd.	DEFAYE Pascal	Cardiologie
PU-PH	DEGANO Bruno	Pneumologie ; addictologie
PU-PH	DEMATTEIS Maurice	Pharmacologie fondamentale ; pharmacologie clinique ; addictologie
PU-PH émérite	DEMONGEOT Jacques	Biostatistiques, informatique médicale et technologies de communication
MCU-PH	DERANSART Colin	Physiologie
PU-PH	DESCOTES Jean-Luc	Urologie
PU-PH	DETANTE Olivier	Neurologie
MCU-PH	DIETERICH Klaus	Génétique
MCU-PH	DOUTRELEAU Stéphane	Physiologie
PU-PH	DUMESTRE PÉRARD Chantal	Immunologie
PU-PH	ÉPAULARD Olivier	Maladies infectieuses ; Maladies tropicales
MCU-PH	EVAÏN Jean-Noël	Anesthésiologie-réanimation et médecine périopératoire
MCU-PH	EYSSERIC Hélène	Médecine légale et droit de la santé
PU-PH émérite	FAGRET Daniel	Biophysique et médecine nucléaire
PU-PH	FAUCHERON Jean-Luc	Chirurgie viscérale et digestive
PU-PH	FAURE Julien	Biochimie et biologie moléculaire
PU-PH	FERRETTI Gilbert	Radiologie et imagerie médicale
PU-PH	FIARD Gaëlle	Urologie
PU-PH	FONTAINE Éric	Nutrition
PU-PH émérite	FRANÇOIS Patrice	Épidémiologie, économie de la santé et prévention
PR Ass. Méd.	FREY Gil	Chirurgie thoracique et cardiovasculaire
MCU-MG	GABOREAU Yoann	Médecine Générale
PU-PH	GARBAN Frédéric	Hématologie ; Transfusion
PU-PH	GAUDIN Philippe	Rhumatologie
MCU-PH	GAUTIER-VEYRET Elodie	Pharmacologie fondamentale ; pharmacologie clinique ; addictologie
PU-PH	GAVAZZI Gaëtan	Médecine interne ; gériatrie et biologie du vieillissement ; addictologie

CORPS	NOM Prénom	DISCIPLINE UNIVERSITAIRE
PU-PH	GAY Emmanuel	Neurochirurgie
MCU-PH	GIAI Joris	Biostatistiques, informatique médicale et technologies de communication
MCU-PH	GILLOIS Pierre	Biostatistiques, informatique médicale et technologies de communication
PU-PH	GIOT Jean-Philippe	Chirurgie plastique, reconstructrice et esthétique ; Brûlologie
MCU-PH	GRAND Sylvie	Radiologie et imagerie médicale
PU-PH émérite	GRIFFET Jacques	Chirurgie infantile
PU-PH	HAINAUT Pierre	Biochimie et biologie moléculaire
PU-PH	HENNEBICQ Sylviane	Biologie et médecine du développement et de la reproduction ; gynécologie médicale
PU-PH	HOFFMANN Pascale	Gynécologie-obstétrique ; gynécologie médicale
PU-PH émérite	HOMMEL Marc	Neurologie
PU-MG	IMBERT Patrick	Médecine Générale
PU-PH émérite	JOUK Pierre-Simon	Génétique
PU-PH	KAHANE Philippe	Physiologie
PU-PH	KASTLER Adrian	Radiologie et imagerie médicale
MCU-PH	KHERRAF Zine-Eddine	Biologie et médecine du développement et de la reproduction ; gynécologie médicale
PU-PH	KRAINIK Alexandre	Radiologie et imagerie médicale
PU-PH	LABARÈRE José	Épidémiologie, économie de la santé et prévention
PU-PH	LABLANCHE (CORNALI) Sandrine	Endocrinologie, diabète et maladies métaboliques
PU-PH	LANDELLE Caroline	Bactériologie – virologie ; Hygiène hospitalière
PU-PH	LANTUEJOL Sylvie	Anatomie et cytologie pathologiques
PR Ass. Méd.	LARAMAS Mathieu	Cancérologie ; radiothérapie
MCU-PH	LARDY Bernard	Biochimie et biologie moléculaire
PU-PH	LAURENT-COSTENTIN Charlotte	Gastroentérologie ; hépatologie ; addictologie
MCU-PH	LE GOUËLLEC LE PISSART Audrey	Biochimie et biologie moléculaire
MCU-PH	LE MARÉCHAL Marion	Maladies infectieuses ; maladies tropicales
PU-PH	LECCIA Marie-Thérèse	Dermato-vénérologie
PR Ass.MG	LEDOUX Jean-Nicolas	Médecine Générale
PU-PH émérite	LÉTOUBLON Christian	Chirurgie viscérale et digestive
PU-PH émérite	LÉVY Patrick	Physiologie
PU-PH	LONG Jean-Alexandre	Urologie
MCU-PH	LUPO Julien	Bactériologie-virologie ; Hygiène hospitalière
PU-PH	MAÎTRE Anne	Médecine et santé au travail
MCU-PH	MARLU Raphaël	Hématologie ; Transfusion
PR Ass. Méd.	MATHIEU Nicolas	Gastroentérologie ; hépatologie ; addictologie
MCU-PH	MAUBON Danièle	Parasitologie et mycologie
PU-PH	MAURIN Max	Bactériologie-virologie ; Hygiène hospitalière
MCU-PH	MC LEER Anne	Histologie, embryologie et cytogénétique
MCU-PH	MEONI Sara	Neurologie
PR Ass. Méd.	MICHY Thierry	Gynécologie-obstétrique
MCU-PH	MONDET Julie	Histologie, embryologie et cytogénétique
PU-PH	MORAND Patrice	Bactériologie-virologie ; Hygiène hospitalière
PU-PH	MOREAU-GAUDRY Alexandre	Biostatistiques, informatique médicale et technologies de communication
PU-PH	MORO Elena	Neurologie

CORPS	NOM Prénom	DISCIPLINE UNIVERSITAIRE
PU-PH	MORO-SIBILOT Denis	Pneumologie ; addictologie
MCU-PH	MORTAMET Guillaume	Pédiatrie
PU-PH émérite	MOUSSEAU Mireille	Cancérologie ; radiothérapie
PU-PH émérite	MOUTET François	Chirurgie plastique, reconstructrice et esthétique ; brûlologie
PR Ass.MG	ODDOU Christel	Médecine Générale
PR Ass. Méd.	ORMEZANO Olivier	Cardiologie
MCU-PH	PACLET Marie-Hélène	Biochimie et biologie moléculaire
PU-PH	PAILHÉ Régis	Chirurgie orthopédique et traumatologie
PU-PH	PALOMBI Olivier	Anatomie
PU-PH	PARK Sophie	Hématologie ; Transfusion
PR Ass.MG	PAUMIER-DESBRIÈRES Françoise	Médecine Générale
PU-PH	PAYEN DE LA GARANDERIE Jean-François	Anesthésiologie-réanimation et médecine péri-opératoire
MCU-PH	PAYSANT François	Médecine légale et droit de la santé
MCU-PH	PELLETIER Laurent	Biologie cellulaire
PU-PH	PELLOUX Hervé	Parasitologie et mycologie
PU-PH	PÉPIN Jean-Louis	Physiologie
PU-PH	PÉRENNOU Dominique	Médecine physique et de réadaptation
PAST	PICARD Julien	Anesthésiologie-réanimation et médecine péri-opératoire
PU-PH	PERNOD Gilles	Chirurgie vasculaire ; Médecine vasculaire
MCF	PINSULT Nicolas	Sciences de la rééducation et de réadaptation
PU-PH	PIOLAT Christian	Chirurgie infantile
PU-PH émérite	PISON Christophe	Pneumologie ; Addictologie
PU-PH	PLANTAZ Dominique	Pédiatrie
PU-PH	POIGNARD Pascal	Bactériologie-virologie ; Hygiène hospitalière
PU-PH émérite	POLACK Benoît	Hématologie ; Transfusion
PU-PH	POLOSAN Mircea	Psychiatrie d'adultes ; Addictologie
PU-PH émérite	RAMBEAUD Jean-Jacques	Urologie
PU-PH	RAY Pierre	Biologie et médecine du développement et de la reproduction ; gynécologie médicale
PR Ass. Méd.	RECHE Fabian	Chirurgie viscérale et digestive
MCU-PH	RENDU John	Biochimie et biologie moléculaire
MCU-PH émérite	RIALLE Vincent	Biostatistiques, informatique médicale et technologies de communication
PU-PH	RIETHMULLER Didier	Gynécologie-obstétrique ; gynécologie médicale
PU-PH	RIGHINI Christian	Oto-rhino-laryngologie
PU-PH émérite	ROMANET Jean Paul	Ophtalmologie
PU-PH	ROSTAING Lionel	Néphrologie
PU-PH	ROUSTIT Matthieu	Pharmacologie fondamentale ; pharmacologie clinique ; addictologie
MCU-PH	ROUX-BUISSON Nathalie	Biochimie et biologie moléculaire
PR Ass.MG	ROYER DE VÉRICOURT Guillaume	Médecine Générale
PU-PH émérite	SARAGAGLIA Dominique	Chirurgie orthopédique et traumatologie
MCU-PH	SATRE Véronique	Génétique
PU-PH	SAUDOU Frédéric	Biologie cellulaire
PU-PH	SCHMERBER Sébastien	Oto-rhino-laryngologie
PU-PH	SCHWEBEL Carole	Médecine intensive-réanimation

CORPS	NOM Prénom	DISCIPLINE UNIVERSITAIRE
PU-PH	SCOLAN Virginie	Médecine légale et droit de la santé
PU-PH	SEIGNEURIN Amaud	Épidémiologie, économie de la santé et prévention
PU-PH	SPEAR Rafaëlle	Chirurgie vasculaire ; médecine vasculaire
PU-PH émérite	STAHL Jean-Paul	Maladies infectieuses ; Maladies tropicales
PU-PH	STANKE Françoise	Pharmacologie fondamentale ; pharmacologie clinique ; addictologie
MCU-PH	STASIA Marie-José	Biochimie et biologie moléculaire
PU-PH	STURM Nathalie	Anatomie et cytologie pathologiques
PU-PH	TAMISIER Renaud	Physiologie
PU-PH	THEVENON Julien	Génétique
PU-PH	TOFFART Anne-Claire	Pneumologie ; Addictologie
PU-PH	TONETTI Jérôme	Chirurgie orthopédique et traumatologie
PU-PH	TOUSSAINT Bertrand	Biochimie et biologie moléculaire
PU-PH	VALMARY-DEGANO Séverine	Anatomie et cytologie pathologiques
PU-PH	VANZETTO Gérald	Cardiologie
PU-PH	VIGLINO Damien	Médecine d'urgence
PU-PH	VUILLEZ Jean-Philippe	Biophysique et médecine nucléaire
PU-PH	WEIL Georges	Épidémiologie, économie de la santé et prévention
PU-PH	ZAQUI Philippe	Néphrologie
PU-PH émérite	ZARSKI Jean-Pierre	Gastroentérologie ; hépatologie ; addictologie

PU-PH	Professeur des universités - Praticien hospitalier
MCU-PH	Maître de conférences des universités - Praticien hospitalier
PU-PH émérite*	Professeur des universités - Praticien hospitalier émérite
MCU-PH émérite*	Maître de conférences des universités - Praticien hospitalier émérite
PU-MG	Professeur des universités de médecine générale
MCU-MG	Maître de conférences des universités de médecine générale
MCF	Maître de conférences des universités
PR Ass. Med.	Professeur des universités associé (à mi-temps)
PR Ass. MG	Professeur des universités de médecine générale associé (à mi-temps)
MCF Ass.MG	Maître de conférences des universités de médecine générale associé (à mi-temps)
PAST	Professeur associé en service temporaire

# **REMERCIEMENTS**

## **1- A mon jury de thèse :**

**A mon directeur de thèse Stéphane :** Merci de m'avoir accueillie dans ton service, de m'avoir fait découvrir, aimer, et enseigner le monde de la cardiologie du sport ainsi que des EFX. Je te remercie également de m'avoir entraînée dans la médicalisation d'événements sportifs tel que l'UTMB. Tu as su être compréhensif et patient devant ma légère tendance à prioriser le grand air à ma thèse... Donc un grand merci pour ton encadrement dans ce travail. Je suis très fière de t'avoir comme directeur de thèse.

**A mon second co-directeur de thèse Benoit :** A toi qui as trouvé le temps entre ta convalescence, ton métier de réanimateur à Grenoble ou en Corse, ta thèse de sciences, ton titre de Local Legend, de me transmettre les us et coutumes en recherche clinique et en écriture d'articles scientifiques. Il en a fallu du temps et de la patience ! Merci.

**A Gérald mon président de thèse,** « père » des internes de cardiologie. Merci de me faire l'honneur de présider ce jury. Merci pour l'incroyable enseignement que tu m'as apporté dès l'externat : en FIHU ou lors de tes visites professorales au 8<sup>ème</sup>A. Mon choix de spécialité n'en a été que renforcé. Tu m'as également prêté une oreille attentive durant tout mon internat ; respectant mes choix de vie, à l'écoute de mes doutes et difficultés, avec toujours les mots justes pour me relancer.

**A Loïc, papa 2<sup>ème</sup> du nom :** mon binôme annécien, tu as su m'accueillir aussi bien dans ton service que dans tes loisirs. Une détermination exaltante et rassurante qui m'a donné envie de me dépasser pour te suivre dans tes projets : d'une présentation en congrès national, au docteur junior, en passant par les courses de ski alpinisme et les trails tel que la Maxi Race ou la SainteLyon. Au travers de ton regard, j'ai su grandir et prendre de l'assurance. Pour tout cela, merci.

**A Océane ma bonne étoile :** ma collègue, mon amie. Des premières visites dans les couloirs du CHANGE aux longues discussions à 2h du matin autour d'un verre de vin. Très vite, nous nous sommes découvert des points communs : le sport, nos histoires de vie, les projets loufoques jamais réalisés, tout cela avec toujours une pointe d'hyperactivité... Merci de garder toujours un œil bienveillant sur moi.

2- **Aux 5 athlètes volontaires** qui ont donnés de leur temps (et de leur énergie) pour ce travail ; **Anthony, Pierre, Vincent, Léo et Cédric**. Je suis toujours partante pour partager vos sorties vélo « récupération », même si moi, je suis déjà au seuil ...

### 3- **A ma famille ;**

**Maman, Papa, Loïc, Pp** qui m'ont toujours soutenue, malgré leurs gros doutes non avoués sur mon avenir après mon redoublement du CP. Depuis mon inscription en PACES pour pharma, ma bifurcation vers la médecine et mon objectif un peu fou de faire de la cardiologie. Beaucoup de weekends à mon bureau dans une chambre surchauffée, à descendre pour des repas chronométrés, ces Noël et anniversaires ratés, ma mine un chouia renfermée... Mille mercis de m'avoir toujours encouragée vers cet avenir.

Oui cher **jumeau**, aujourd'hui je suis docteur même si tu me vois encore comme ta toute petite sœur ; Oui un jour tu trouveras peut-être utile d'avoir un cardiologue dans la famille.

A toi ma **grande sœur**, mon modèle, ma vétérinaire qui réalise aussi bien les drainages de péricarde de chiens que les vélages. J'attends encore de voir un cardiologue réaliser une césarienne... Merci pour ton soutien tant dans le travail que la vie personnelle, et ton sens de la fête ! A quand notre clinique animaux/humains ?!

A **ma petite Maman**, toujours prête à me rejoindre à Grenoble avec des huitres quand le moral est dans les chaussettes, tu trouves les mots justes et ta présence est d'un réconfort sans limites. Merci d'être toi, merci pour ton ouverture d'esprit et ta compréhension. Tu es une merveilleuse Maman.

**A mon Papa**, qui passe son temps à dire que « ses enfants ne sont pas de lui, ils sont trop intelligents ». Tu as su nous transmettre les valeurs qui m'ont permis d'en être là aujourd'hui : la persévérance, le travail, la compétitivité. Je t'en remercie.

### 4- **A ceux qui ont fait le médecin que je suis aujourd'hui**

Au CHU : avec **Estelle, Marjorie, Charlotte** lors de mes débuts d'interne au 8<sup>ème</sup> C en m'apprenant les premiers automatismes de cardiologue. Avec **Nico, Sara, Gérald, Stéphanie, Soumaya**, vous qui m'avez fait découvrir l'effervescence de l'USIC, des gardes mais aussi du ski nautique sur le Lac du Bois Français. Malgré mon départ précoce du CHU, c'est toujours un plaisir de vous retrouver autour d'un verre ou sur le dancefloor en Claudette.

A la clinique mutualiste : mille merci **Léa** pour ton enseignement en échographie ou sur la prise en charge de l'orage rythmique lors de mon passage à l'USIC, tu es une cardiologue doublée d'une femme en or. Tu es devenue une réelle amie pour moi et restera toujours mon modèle dans tous les domaines. Ne change surtout pas !

Merci **Benji**, à la fois co-interne, assistant, DJ, complice d'aventures ou de soirées, mais surtout un copain extraordinaire. Les 6 mois dans le « bureau des seins nus » avec Léa et toi furent un réel plaisir et c'est avec un gros pincement au cœur que je le quitte. Merci d'être toi. Je t'attends à Annecy.

Merci à vous, **Pierre et Thierry** de m'avoir formée à l'échographie d'effort, même si mon compte en banque s'est beaucoup allégé quand il s'agit de parler vélo avec vous ! Merci pour votre rigueur, vos remarques, votre perfectionnisme ; j'ai beaucoup appris avec vous.

Merci à toi **Paul** de m'avoir initiée à la rythmologie et aux stimulateurs cardiaques. Je serai dorénavant un peu moins démunie devant un Pacemaker ou un défibrillateur.

Merci à vous la team Coro : **Jacques, Mohamed, Benjamin** pour votre disponibilité et votre gentillesse face à mes interrogations de type « plomberie ». C'est toujours un plaisir de passer du temps avec vous que ça soit pour mon premier drainage péricardique (Merci Mohamed !), à Chamonix ou ailleurs !

En réadaptation cardiaque à l'hôpital Sud : **Marianne, Sandrine, Pascale, Marjo, Noé, Manon, Carole**, vous m'avez permis de rencontrer nos patients dans leur environnement et ainsi, m'avez transmis les principes de « qualité de vie » et « d'éducation thérapeutique ». Sans parler des footings dans la Frange Verte entre midi et deux ! Vous avez été un vrai bol d'air pour moi et je ne cesserai de chanter vos louanges auprès de mes patients pour les convaincre de venir vous voir.

A Annecy : avec ceux qui ont chamboulé mon projet de vie. Partie pour 6 mois, me revoilà très bientôt comme docteur junior. Un grand merci à toi **Océane** pour nos staff by Salomon, à **Benjamin** pour m'avoir rattrapée lors de mes oublis de garde, à vous **Pr Mathieu** mon interne, mon assistant et maintenant mon collègue pour ton savoir en USICologie, à toi **Amine** pour nos semaines non désirées en USIC à poser des VVAC, à toi **Abdel** pour ton humeur toujours joyeuse, à toi **Antoine** pour les bières et footings, à toi **Pierre** pour m'avoir

laissée m'entraîner en ETO sur tes ablations, à toi **Didier** pour ton savoir en cardiologie du sport et ta bienveillance, à toi **Antoine** pour tes quizz ECG, à toi **Chrystelle** toujours souriante malgré la charge de travail, à toi **Anne** pour ton soutien et ton efficacité, à toi **Loïc** pour nos départ ski à 3h du matin les dimanches, à vous **Sandra et Nora** pour votre savoir en échographie qui est proportionnel à votre gentillesse (mais pas à votre taille !), à vous **Emmanuelle** pour ces visites où j'ai tant appris sur la montagne, à toi **Lionel** pour ta disponibilité pédagogique en salle d'angio, à toi **Chaco** pour ton esprit aussi sportif que festif, et à toi **Julien** pour tes ronchonnements durant les visites ... Vous êtes une équipe en or, et je suis fière d'en faire partie prochainement.

Avec les réanimateurs d'Annecy ; mais quelle équipe ! **Etienne, PAC, Valentin, Sergio, Marco, Albrice, David, Didier, Renaud, Laura, Michel, Noémie, Paul, Paul, Panh, Simon, Violeta, Aurélie...** merci de m'avoir fait découvrir qu'il existait d'autres organes autour du cœur. Merci pour votre patience et bienveillance hors normes. Vous avez su rendre plus mature et raisonnable ma prise en charge médicale. Merci également pour ces folles soirées et sorties ski. Comme vous avez pu le remarquer, vous m'avez « pimpé » !

Et surtout un grand merci **aux équipes paramédicales** pour leur patience, bienveillance et gentillesse malgré nos airs de Bambi en début (et même en fin !) d'internat. Vous m'avez tant appris qu'encore aujourd'hui, je peux remettre en cause tout mon raisonnement si je décèle de l'étonnement dans votre voix... Merci pour votre patience et vos encouragements quand ma pose de VVC prenait 45min ou que la radiale avait décidé de jouer à cache-cache. Merci de rattraper mes erreurs de prescriptions ou des gestes faits trop rapidement. Merci pour toutes les fois où vous avez tenté de me préserver en essayant de gérer seules les patients et leurs familles, évitant les appels à 4h du matin, et nourrissant mon petit ventre de bonnes choses le dimanche midi en garde. Car je ne peux pas ne pas les citer ; un grand merci aux inf de l'USIC du GHM de m'avoir épaulée, chouchoutée durant mes premières gardes seniors, vous les avez rendues tellement plus simples et agréables.



## **5- A mes amis**

Aux cavaliers du Lys : **Eugé, Margaux, Rémi, Ange, Adrien, Gilles, Eva, Manue, Héro, Camille** ... ; mes premiers amis, mes premières soirées et vacances entre copains. Les années passent, les enfants naissent, les maisons se construisent, les plannings se serrent, mais c'est toujours une bouffée d'oxygène que de vous retrouver dans notre Drôme natale loin du milieu médical.

A celles qui m'ont permis d'effectuer ce lourd internat tout en profitant de mes amis et de mes loisirs en s'occupant si bien de « mon Blond » à 4 pattes ; **Oriane** et **Florence** puis toi **Manue**. Vous avez été des anges pour moi et surtout pour lui. Je ne vous en remercierai jamais assez. Cette réussite, je vous la dois aussi.

A mes premiers copains de Fac, mes amis qui sont aussi mes amoureux ; **Maxime, Edouard, Alexandre et Juliette**. Les mousquetaires, toujours présents dans les meilleurs moments comme dans les multiples codes rouges au Berthom. Hâte de finir en EHPAD avec vous ! A toi aussi **Jean-Mi**, mon binôme, ma bonne étoile, mon remontant ; une amitié qui a su traverser les périples de nos vies, malgré nos différences.

A mes copines de l'externat, ces 12 nanas ; **Juju, Marine, Alex, Lulu, Léa, Malvi, Marie Rouse, Marie Blonde, Mél, Paupau, Flavi** qui ont vécu les épreuves de la vie de carabin ensemble : les roneo, les partiels, les WEI, les WED, les cham, la BU, la Kfet, les conf et les sous conf, les SOS, les ECNs, les premiers pas d'internes comme les derniers...c'est toujours un énorme plaisir de vous retrouver 2 weekends par an au son des hits des années 2000.

A mes co-internes cardiologues qui ont été un réel soutien au cours des semestres. A nos folles soirées post-stages chez **Ben** avec **Rémi, CE, Ikram, Camille** ... suivies de nos matinées piquantes au 8<sup>ème</sup> à chercher les toilettes les plus proches. A ma promo parfaite : les 5 fantastiques, jamais en compétition, légèrement indécise et surtout bien touriste : **Julien, Hala, Apo et Benoit**. J'ai l'impression que c'était hier que je faisais votre connaissance à l'internat, accueillie par **Estelle et Guillaume**. Et aujourd'hui nous sommes Docteurs en cardiologie nos doutes surmontés !

A mes co-internes non-cardiologues mais malgré tout très sympathiques ;

**Nordine** mon coéquipier de début d'internat légèrement chaotique mais ayant donné naissance à une forte amitié ... une collaboration entre internes qui se finira en beauté comme collègue à Annecy !

A **Behouche**, mon anesth préféré et à **Alice** qui ont su rendre si beau notre semestre à l'USIC. Mon cœur palpite quand j'aperçois vos noms dans un dossier et je ne peux m'empêcher de glisser un « *eux ils sont géniaux* » à mon voisin.

A **Loïc**, mon informaticien en herbe qui a dû, pour coder les tréfonds de l'échographe, s'intéresser au STAIN myocardique. Merci ma petite baleine de m'avoir distraite durant notre semestre en médecine du sport.

A **Astrid, Camille, Victor, GuiGui, Alex et Benji** : merci de m'avoir supportée durant mon épisode maniaque et d'avoir ouvert mon esprit de cardiologue... J'espère que vous ne me raccrocherez pas au nez quand je vous proposerai un TAVI de 98ans « bon pied bon œil »... Encore merci pour vos conseils et votre aide dans ce milieu de la réa qui n'était pas le mien.

A **Margot**, pour ton écoute, ta présence, tes banana bread et tes bretzels. Tu as été notre bonne étoile au GHM, toujours partante pour un petit verre en fin de journée ou une folle soirée improvisée !

A mes externes, rares mais marquants qui ont illuminé mon internat ; **Céline et Dylan** lors de mes débuts difficiles, vous m'avez été d'une aide précieuse ; toujours présents pour me décharger d'un peu de travail et me recharger avec beaucoup de chocolat. Je vous dois une fière chandelle.

A toi **Léo**, aussi brillant externe que sportif. Depuis nos premières visites à l'USIC ensemble jusqu'à notre trail en relais sous le nom des TakoTurbo, une belle amitié est née. Je me désole de te voir partir à la Réunion ....

# **SOMMAIRE**

I-	Résumé .....	14
II-	Abréviations.....	16
III-	Introduction.....	17
IV-	Matériel et méthode.....	21
	a. Population .....	21
	b. Examen échographique.....	22
	c. Quantification du travail myocardique.....	23
	d. Exploration fonctionnelle à l'exercice.....	25
	a. $\dot{V}O_{2max}$ , PMA, VMA.....	25
	b. Réalisation pratique en laboratoire.....	25
	e. Travail myocardique à l'effort.....	28
	f. Analyses statistiques.....	30
	g. Variabilité de la mesure du travail myocardique .....	30
V-	Résultats.....	31
	a. Caractéristiques de la population.....	32
	a. Athlètes masculins.....	32
	b. Athlètes féminins.....	36
	b. Relation entre travail myocardique au repos et performance à l'effort.....	41
	c. Travail myocardique à l'effort.....	42
VI-	Discussion.....	45
	a. Résultats principaux.....	45
	b. Force de l'étude.....	45
	c. Pertinence clinique.....	46
	d. Cohérence externe.....	46
	e. Limites de l'étude.....	47
	f. Perspectives.....	48
VII-	Conclusion .....	49
VIII-	Bibliographie.....	51
IX-	Annexes.....	53

# I. RÉSUMÉS

## 1) Résumé

Les paramètres échographiques actuels d'évaluation de la fonction systolique du VG (FEVG/STRAIN) sont d'interprétation difficile chez l'athlète du fait de leur dépendance aux conditions de charge, et se distinguent par des valeurs souvent subnormales voir anormales dans cette population spécifique. Il est pourtant essentiel de pouvoir distinguer un remodelage physiologique de cœur d'athlète et une cardiomyopathie débutante, car le risque au cours de la pratique sportive ne sera évidemment pas le même. Récemment, un nouveau paramètre échographique, indépendant des conditions de charge ventriculaire, a été développé par la société *General Electric* (GE), permettant le calcul du travail myocardique. L'évaluation de ce nouvel indice, reste à ce jour limité dans les populations de sportifs, et est principalement limité aux sportifs d'endurance. Dans une étude observationnelle, rétrospective et monocentrique, conduite au CHU de Grenoble, nous avons comparé les différents paramètres du travail myocardique (indice de travail myocardique, efficacité du travail, travail perdu, travail utile) entre un groupe d'athlètes pratiquant un sport d'endurance (n=62) et un groupe d'athlètes pratiquant un sport dit mixte (n=116). Nous avons également étudié l'association éventuelle entre travail myocardique et performance maximale à l'effort ( $\dot{V}O_{2max}$ ). Chez les hommes (n=157), la  $\dot{V}O_{2max}$  était significativement plus élevée chez les sportifs d'endurance ( $71,8 \pm 11,2$  vs.  $53,0 \pm 10,0$  ml/min/kg,  $p < 0,001$ ), avec un STRAIN significativement plus élevé ( $-19,2 \pm 2,0$  % vs.  $-18,1 \pm 2,0$  %,  $p = 0,02$ ), un volume d'éjection systolique plus élevé ( $p = 0,02$ ) et une oreillette droite plus dilatée ( $p = 0,001$ ) par rapport aux athlètes « mixtes ». Bien que l'indice de travail myocardique ne soit pas significativement différent entre les deux groupes, le travail myocardique perdu était plus faible chez les sportifs d'endurance ( $84,8 \pm 38,3$  mmHg% vs.  $107,3 \pm 42,0$  mmHg%,  $p = 0,002$ ) avec une meilleure efficacité myocardique ( $95,4 \pm 1,9$  % vs.  $94,4 \pm 2,2$  %,  $p = 0,007$ ), en comparaison au groupe « mixte ». En régression linéaire, il n'était pas retrouvé d'association significative entre l'indice de travail myocardique et  $\dot{V}O_{2max}$  ( $p = 0,86$ ). En conclusion, cette étude a permis de renseigner des valeurs de référence du travail myocardique chez les athlètes pratiquants des sports d'endurance et des sports mixtes, ce qui pourrait aider au diagnostic différentiel entre cardiomyopathie et cœur d'athlète. Cependant, en l'absence d'association statistique significative entre indice de travail myocardique et évaluation de la performance des athlètes, la place exacte de ce nouvel indice échographique dans l'évaluation et le suivi du cœur d'athlète reste à déterminer.

## 2) Abstract

The current ultrasound parameters for assessing systolic function of the left ventricle (LV) (LVEF/STRAIN) are challenging to interpret in athletes due to their dependence on loading conditions and are often characterized by values that are subnormal or abnormal in this specific population. However, it is essential to distinguish between physiological remodeling of an athlete's heart and early-stage cardiomyopathy, as the risk during athletic activity will obviously not be the same. Recently, a new ultrasound parameter, independent of ventricular loading conditions, has been developed by General Electric (GE), allowing for the calculation of myocardial work. The evaluation of this new index is currently limited in the athlete population and is primarily restricted to endurance athletes. In an observational, retrospective, and single-center study conducted at the University Hospital of Grenoble, we compared different parameters of myocardial work (myocardial work index, myocardial efficiency work, wasted work and constructive work) between a group of endurance athletes (n=62) and a group of mixed sports athletes (n=116). We also examined the potential association between myocardial work and maximal exercise performance ( $\dot{V}O_{2max}$ ). In men (n=157),  $\dot{V}O_{2max}$  was significantly higher in endurance athletes ( $71.8 \pm 11.2$  vs.  $53.0 \pm 10.0$  ml/min/kg,  $p < 0.001$ ), with significantly higher STRAIN ( $-19.2 \pm 2.0\%$  vs.  $-18.1 \pm 2.0\%$ ,  $p = 0.02$ ), a higher systolic ejection volume ( $p = 0.02$ ), and a more dilated right atrium ( $p = 0.001$ ) compared to "mixed" athletes. Although myocardial work index was not significantly different between the two groups, wasted work was lower in endurance athletes ( $84.8 \pm 38.3$  mmHg% vs.  $107.3 \pm 42.0$  mmHg%,  $p = 0.002$ ) with better myocardial efficiency ( $95.4 \pm 1.9\%$  vs.  $94.4 \pm 2.2\%$ ,  $p = 0.007$ ) compared to mixed sports participants. Linear regression analysis did not reveal a significant association between myocardial work index and  $\dot{V}O_{2max}$  ( $p = 0.86$ ). In conclusion, this study provided reference values for myocardial work in athletes participating in endurance and mixed sports, which could help in the differential diagnosis between cardiomyopathy and athlete's heart. However, in the absence of a statistically significant association between myocardial work index and athletic performance assessment, the exact role of this new ultrasound index in the evaluation and monitoring of athlete's heart remains to be determined.

## **II. ABRÉVIATIONS**

CW : Constructive work ; travail constructif  
ECG : Électrocardiogramme  
EFX : Exploration fonctionnelle à l'exercice  
ET : Écart-type  
ETT : Échographie transthoracique  
FEVG : Fraction d'éjection du ventricule gauche  
GE : General Electric  
GLS : Global Longitudinal STRAIN  
MW : Myocardial Work ; Travail myocardique  
PA : Pression artérielle  
PMA : Puissance maximale aérobie  
SaO<sub>2</sub> : Saturation en oxygène  
STRAIN : Speckle tracking imaging  
TDI : Tissue Doppler Imaging  
TM : Temps mouvement  
VD : Ventricule droit  
VEmax : Ventilation minute maximale  
VG : Ventricule gauche  
VMA : Vitesse maximale aérobie  
 $\dot{V}O_{2max}$  : consommation maximale en oxygène  
WE : Work efficiency; efficacité myocardique  
WI : Work index; indice de travail myocardique  
WW : Wasted work ; travail perdu

### **III. INTRODUCTION**

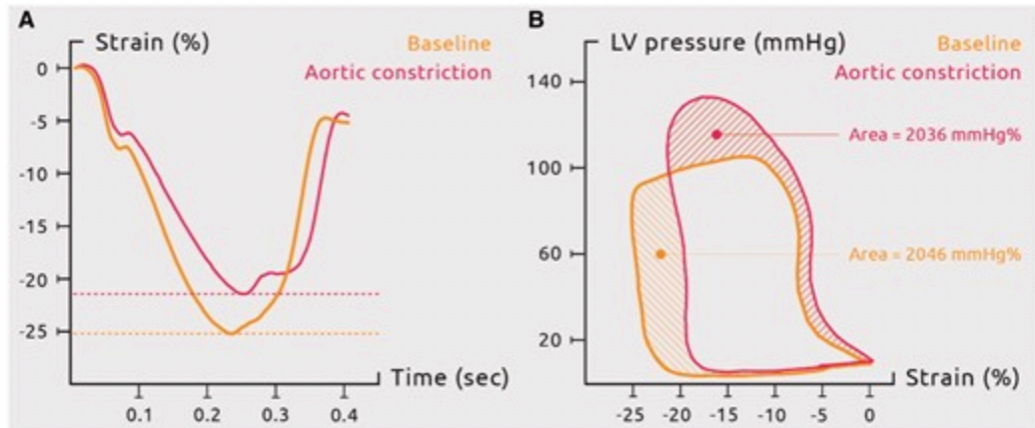
L'entraînement physique intense et régulier induit des changements adaptatifs dans la structure et la fonction cardiaque qui permettent au cœur de répondre aux besoins métaboliques en permettant une plus importante augmentation du débit cardiaque pendant l'effort (1, 2). Ce remodelage dit physiologique, quantitativement et qualitativement variable, conduit à une efficacité cardiaque améliorée.

Actuellement, la plupart des indices conventionnels utilisés en pratique courante mesurant la fonction systolique ventriculaire gauche (VG), ne fournissent qu'une estimation approximative de la fonction contractile. Les athlètes présentent d'ailleurs souvent des paramètres de fonction systolique [par exemple, fraction d'éjection (FE)] dans la plage normale basse au repos (et parfois à moins de 50%), malgré une augmentation de leur réserve contractile (1, 2, 3, 4, 5). Ce phénomène peut conduire à une interprétation difficile des échocardiogrammes au repos et peut poser la question de la différenciation entre un remodelage VG physiologique et un processus pathologique.

Plus récemment, le STRAIN global longitudinal (GLS) ventriculaire gauche a permis une avancée significative dans l'étude fonctionnelle échographique du VG. En effet il permet de détecter des altérations plus fines de la fonction systolique du VG alors même que la FEVG est normale (6). Cette technique a comme avantage d'être indépendante de l'angle utilisé pour l'évaluation des composantes longitudinales, circonférentielles et radiales de la déformation myocardique. Parmi ces différents paramètres de contrainte, la contrainte longitudinale VG est apparue comme un indice robuste et reproductible pour estimer la fonction ventriculaire globale et segmentaire et pour détecter une dysfonction myocardique subclinique. Bien que la déformation longitudinale du VG permette d'évaluer la déformation du VG, ce paramètre reste lui aussi dépendant des conditions de charge et peut être prit à défaut dans le cœur d'athlète chez qui le STRAIN peut-être, comme la FEVG, abaissé au repos (7).

La meilleure méthode d'analyse de la fonction contractile VG reste l'accès à la relation pression/volume intra-VG ou, comme la mesure du volume ventriculaire est compliquée, la relation pression/STRAIN. Il s'agit d'une analyse précise, mais invasive, pour quantifier la fonction ventriculaire indépendamment des conditions de charge. Par exemple, comme on peut le voir sur la *figure 1*, devant une modification brutale des conditions de charge (ici une augmentation de la post-charge), le travail myocardique ne varie pas (la surface de la courbe

débit-volume est constante) alors que le STRAIN diminue. Un accès non invasif à la relation pression/STRAIN serait donc un outil intéressant pour évaluer précisément la fonction VG, en particulier chez l'athlète.



**Figure 1** : STRAIN myocardique (A) et courbe pression-STRAIN VG (B) d'une expérience canine avant (courbe jaune) et pendant une ligature aortique (courbe rouge). La pression maximale du VG a augmenté d'environ 30 mmHg et était associée à une diminution substantielle du STRAIN (8).

Afin de tenter de contourner cette limitation du STRAIN, L'équipe d'Espen Boe (8) a donc développé en 2019 une méthode non invasive pour évaluer le travail myocardique régional en utilisant l'analyse de la courbe pression-STRAIN ne dépendant pas des conditions de charge.

### ***Travail myocardique ; indice de travail myocardique, travail constructif, travail perdu, efficience du travail***

Dans un cœur normal, les différents segments du VG se contractent et se relâchent de façon quasi-synchrone pour contribuer efficacement au volume d'éjection systolique et au débit cardiaque.

Le travail fourni par chaque segment pour se contracter (raccourcissement du myocarde en systole, allongement de diastole) est appelé « travail constructif ».

Lorsqu'il existe un asynchronisme de contraction, comme on le voit au cours des blocs de branche par exemple, au cours d'une ischémie myocardique et d'autres maladies du myocarde, il peut y avoir un allongement systolique des myocytes lors de l'éjection du VG ce qui représente un « travail perdu » puisqu'il ne contribue pas à l'éjection du VG. Il en est de même lorsque certains segments se raccourcissent après la fermeture de la valve aortique



(raccourcissement post-systolique) qui représente également un travail inutile puisqu'il ne contribue pas à l'éjection du VG.

L'efficience du travail myocardique est définie comme étant le rapport entre le travail constructif et la somme du travail perdu et constructif, exprimé en pourcentage ou en valeur absolue. Comme l'a montré l'équipe de Otto A. Smiseth (9), et comme cela a été confirmé dans l'étude de Chan et al. (10), dans un cœur normal et chez des sujets non-athlètes, il y a très peu de travail perdu, et donc une efficience de travail élevée. Le travail perdu réduit l'efficacité du VG en ajoutant une charge mécanique supplémentaire au myocarde et participant au remodelage négatif du ventricule.

L'indice de travail myocardique est calculé pour chaque segment VG comme la différence entre le travail effectué lors du raccourcissement du segment et le travail effectué lors de l'allongement du segment.

L'indice global de travail myocardique (GWI, *Global work index*), le travail constructif global (GCW, *global constructive work*), le travail perdu global (GWW, *global work waste*) et l'efficience du travail global (GWE, *global work efficiency*) sont des indices globaux calculés comme la moyenne de ces 4 indices, calculés pour les 18 segments ventriculaires.

Le *tableau 1* résume les définitions des différents paramètres du travail myocardique (MW).

**Tableau 1 : Définitions des paramètres du travail myocardique.**

Indice de travail myocardique (WI) (mmHg%)	Travail myocardique total depuis la fermeture de la valve mitrale jusqu'à l'ouverture de la valve mitrale.
Travail constructif (CW) (mmHg%)	Travail myocardique lors du raccourcissement en systole et de l'allongement lors de la phase de relaxation isovolumique.
Travail perdu (WW) (mmHg%)	Travail myocardique lors de l'allongement en systole et du raccourcissement lors de la phase de relaxation isovolumique.
Efficience du travail myocardique (WE) (%)	Calculé comme le rapport de : $CW/(CW + WW)$ .

Par la suite, l'équipe rennaise d'Erwan Donal a étudié le MW chez des sujets sains d'âges différents et a pu donner des valeurs de référence chez des sujets non-athlètes (11) (*annexe 2*). D'autres auteurs ont également proposé des valeurs de référence (12).

Plus récemment, il a été rapporté des valeurs de travail myocardique chez 350 athlètes d'endurance comparativement à des sujets non sportifs ( $n=150$ ) (13). Dans cette étude, bien que la FEVG soit comparable entre les deux groupes, le STRAIN longitudinal VG était significativement réduit dans le groupe athlète ( $-18,4 \pm 2,6\%$  vs.  $-22,4 \pm 3,3\%$ ,  $p<0,01$ ). Cependant il n'était pas observé de différence entre les deux groupes en termes de travail myocardique. De manière intéressante, dans cette étude, il était néanmoins observé, en analyse multivariée, une association statistiquement significative, entre l'efficacité du travail myocardique au repos, et les capacités maximales à l'exercice (PMA ; puissance maximale aérobie et  $\dot{V}O_{2max}$  ; consommation maximale en oxygène) ( $r=0,45$  ;  $p<0,001$  et  $r=0,63$  ;  $p<0,0001$  respectivement). Cependant, une des limitations majeures de cette étude, concernait les performances maximales à l'exercice du groupe d'athlète d'endurance ; bien que significativement plus élevés que celle du groupe contrôle, celles-ci restaient relativement modestes pour un groupe d'athlète entraîné en endurance (PMA  $250 \pm 35$  watts,  $\dot{V}O_{2max}$   $58,6 \pm 10,2$  ml/min/kg).

Dans une étude animale (14), les rats entraînés avaient des valeurs de STRAIN et de WI plus élevées que les rats non entraînés. Une corrélation significative ( $r=0,764$ ,  $p<0,001$ ) était retrouvée entre le WI et la contractilité cardiaque mesurée de façon invasive. Parallèlement, ces auteurs avaient étudié chez l'homme la relation entre MW et  $\dot{V}O_{2max}$  chez 20 nageurs élités ( $\dot{V}O_{2max}$   $58,6 \pm 4,2$  ml/min/kg chez les hommes,  $51,8 \pm 2,8$  ml/min/kg chez les femmes). Dans cette étude l'entraînement était associé à une augmentation du MW au repos (et donc de la contractilité) par rapport au groupe témoin ( $1899 \pm 136$  vs.  $1755 \pm 234$  mmHg%,  $p=0,03$ ) et il existait une corrélation significative ( $r=0,53$ ,  $p<0,001$ ) entre le MW et la  $\dot{V}O_{2max}$ .

Ainsi, les données de la littérature concernant la mesure du MW chez le sportif sont donc encore peu nombreuses à ce jour avec des résultats parfois différents et portent exclusivement chez des athlètes d'endurance. Pourtant, le remodelage du cœur d'athlète est différent selon le

type de sport (15), laissant supposer que les valeurs de travail myocardique pourraient elles aussi être différentes.

Dans ce contexte, nous avons mené une étude observationnelle, rétrospective monocentrique. L'objectif de notre étude est donc 1°) d'évaluer le travail myocardique chez l'athlète et de le comparer, entre 2 groupes de sportifs (athlètes d'endurance et athlètes pratiquants des sports « dits mixtes ») et 2°) de rechercher s'il existait une association statistiquement significative entre le travail myocardique et la performance maximale à l'effort ( $\dot{V}O_{2max}$ ).

## **IV. MATÉRIEL ET MÉTHODES**

### **1) Population**

Nous avons inclus tous les athlètes de haut niveau ayant consulté au CHU de Grenoble-Alpes entre le 25/11/2019 et le 06/03/2023 dans l'unité sports et pathologies pour leur bilan médical obligatoire de leur suivi longitudinal, en vue de l'obtention d'une licence de compétition.

Les critères d'inclusion dans l'étude étaient les suivants : sujet licencié comme sportif de haut niveau, âgé entre 16 et 50 ans, ne présentant aucun antécédent ou symptôme de maladie cardiovasculaire ou pulmonaire, un électrocardiogramme (ECG) et un examen clinique normaux. Les critères de non-inclusion comprenaient : la découverte ou l'existence d'une cardiopathie, une fenêtre acoustique apicale médiocre, une grossesse. Un même athlète pouvait être inclus deux fois au cours de cette période.

Les athlètes ont été classés selon le type de sport qu'ils pratiquaient selon la nouvelle classification de l'ESC (*figure 2*) : sports d'endurance (course à pied, cyclisme, trail, ski de fond, triathlon, course d'orientation, ski alpinisme, biathlon), sports mixte (rugby, patinage artistique, hockey, volley, football, basket), sports de force (ski alpin, escalade, bobsleigh, snow-board) ou sports d'adresse (sport automobile, vol libre). Par la suite, dans l'étude, seuls les athlètes des groupes endurance et mixte ont été étudiés, du fait d'un nombre trop faible d'athlètes dans les groupes sports de force (n=10) et sports d'adresse (n=3) ayant consulté pendant cette période.

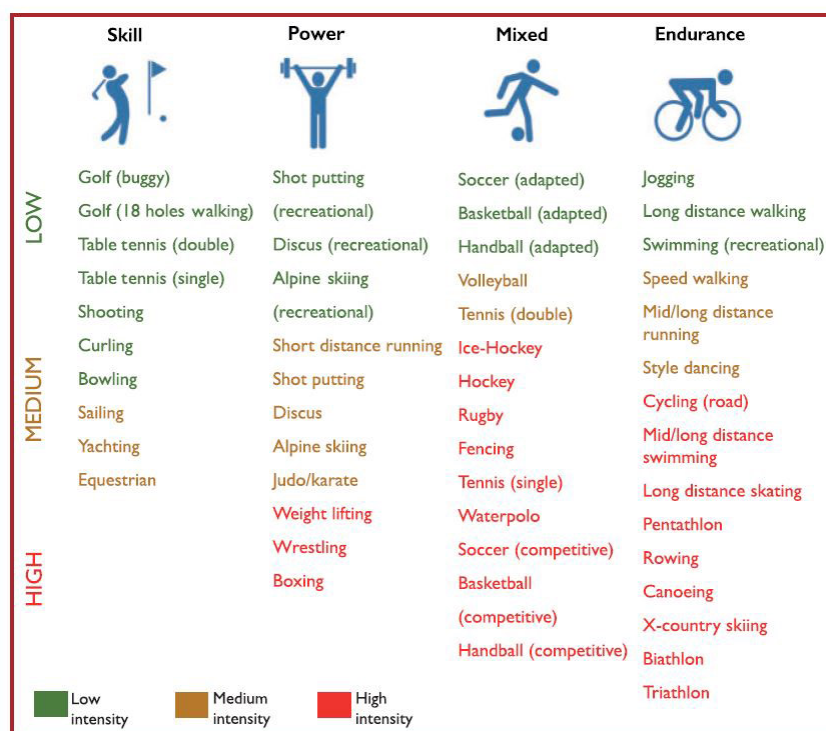


Figure 2 : classification des exercices physiques et sports des recommandations de l'ESC 2020 (16).

Conformément à la législation française, la conduite de cette étude rétrospective n'impliquant pas la personne humaine (RNIPH), ne nécessitait pas l'avis d'un comité de protection des personnes. La conduite de cette étude a été approuvée par la Direction de la Recherche Clinique et de l'Innovation (DRCI) et le traitement des données a été conforme à la méthodologie de référence MR004. Une information des participants concernant la possibilité de s'opposer à l'utilisation de leurs données personnelles à des fins de recherche a été réalisée dans le service (affichage en salle d'attente, document d'information du service).

## 2) Examen échocardiographique

Tous les participants de l'étude ont bénéficié d'une échocardiographie transthoracique standard à l'aide d'un échographe Vivid S70N (GE Vingmed Ultrasound, Horten, Norvège). Nous avons recueilli les paramètres classiques (17):

- En coupe parasternale : épaisseur du septum interventriculaire et de la paroi postérieure, diamètre de la cavité VG en systole et en diastole, permettant le calcul de la fraction de raccourcissement, de la fraction d'éjection, de la masse et du volume du VG.
- En coupe apicale : les volumes des oreillettes et du ventricule gauche et la surface du VD.
- Le flux mitral enregistré en doppler pulsé a permis de recueillir l'onde E et l'onde A. Le TDI (Tissue Doppler Imaging) a été utilisé pour mesurer les vitesses de déplacement de l'anneau mitral latérale (E'). Le rapport de E/E' a été considéré comme un indice de la pression moyenne de remplissage du VG. La pression artérielle pulmonaire systolique a été estimée à partir du flux tricuspide enregistré en doppler continu.
- La fonction ventriculaire droite (VD) systolique a été estimée par doppler tissulaire (onde S'), en plaçant un curseur sur l'anneau tricuspide latéral en vue quatre cavités ainsi que par le biais de la fraction de raccourcissement (rapport des surfaces systolique et diastolique en 2D).
- Enfin le STRAIN VG a été calculé sur des images 2D en échelle de gris sur des coupes apicales quatre cavités, trois cavités et deux cavités. Le STRAIN VD a été quant à lui calculé sur une coupe quatre cavités centrée sur le VD.

### 3) Quantification du travail myocardique

Le travail myocardique a été estimé à l'aide d'un module spécifique (EchoPAC Version 202, GE Vingmed Ultrasound) à partir des boucles enregistrées lors de l'ETT. Le MW a été calculé en fonction du temps tout au long du cycle cardiaque par la combinaison des données de contrainte VG obtenues en STRAIN et de la courbe de pression VG estimée de manière non invasive, comme décrit précédemment par Russel et al. (9). En pratique, les images 2D en niveaux de gris ont été acquises dans les vues apicales standard (quatre, trois et deux cavités) à une fréquence d'image  $\geq 80$  images/s. Puis les enregistrements ont été traités à l'aide du logiciel dédié au suivi acoustique (EchoPAC Version 202, GE Vingmed Ultrasound), pour estimer le GLS du VG. La pression artérielle mesurée avec un tensiomètre à brassard en position couchée au début de l'examen a été utilisée pour approximer la pression systolique maximale du VG. La courbe de pression VG non invasive a ensuite été obtenue à l'aide d'une courbe de référence empirique normalisée qui a été ajustée en fonction de la durée des phases isovolumétrique d'éjection du VG, définie par les mouvements valvulaires aortique et mitrale par

échocardiographie (figure 3A). Les données de déformation et de pression ont été synchronisées en utilisant l'onde R sur l'ECG comme référence de temps commune. Le MW a ensuite été quantifié en calculant le taux de raccourcissement segmentaire par différenciation de la courbe de déformation et en multipliant cette valeur avec la pression VG instantanée (figure 3B).

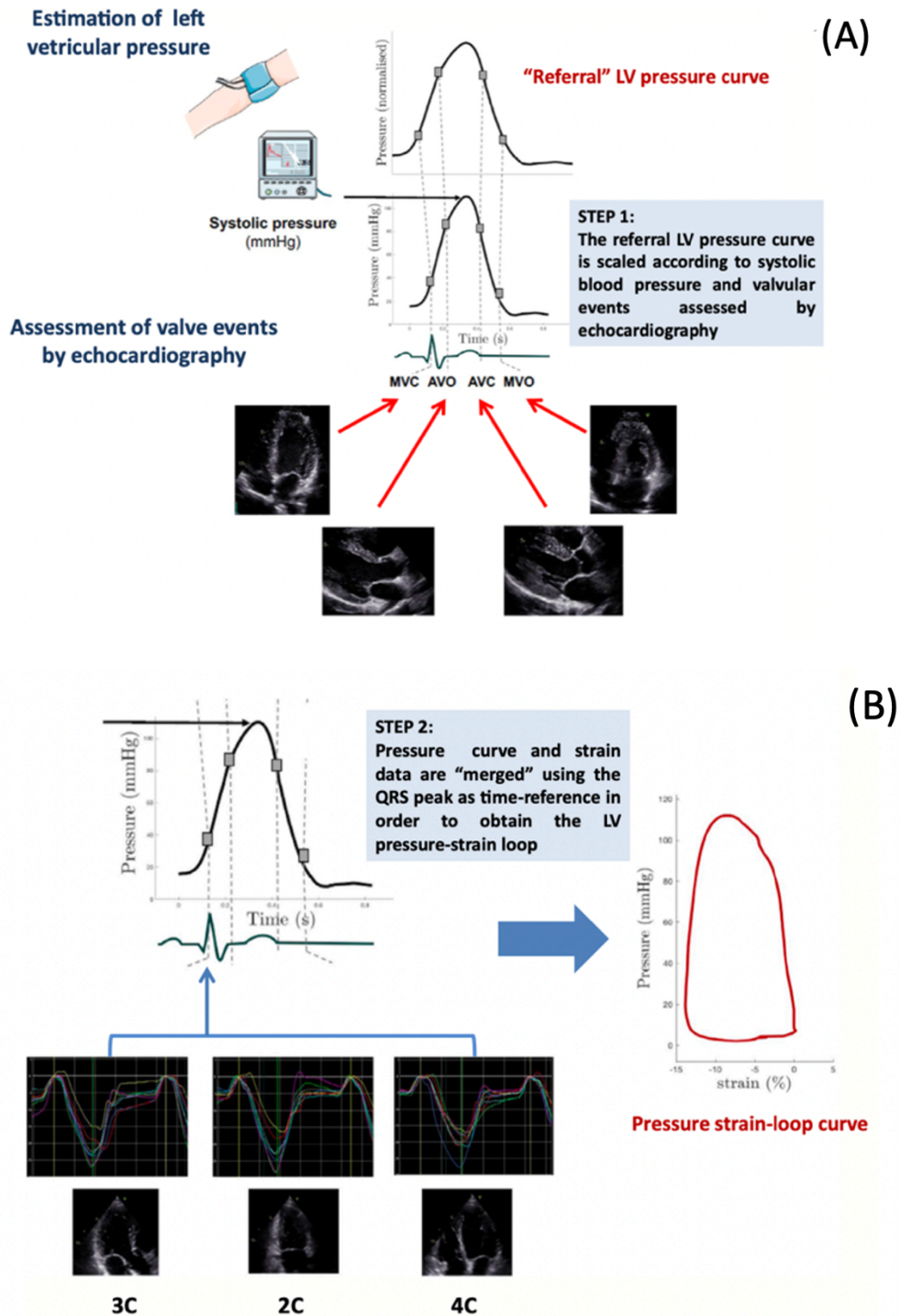


Figure 3 : Exemple d'estimation de la courbe de pression VG. La courbe de pression VG non invasive a été obtenue à partir d'une courbe de référence empirique normalisée ajustée en fonction de la durée des phases iso-volumiques et d'éjection du ventricule gauche (11).

#### 4) Exploration fonctionnelle à l'exercice (EFX)

L'exploration fonctionnelle à l'exercice (EFX) a été réalisée soit sur ergocycle (marque GE eBike) soit sur un tapis roulant (marque h/p/cosmos®) avec une mesure continue des échanges gazeux (logiciel GE CardioSoft V6.73). Les paramètres suivants, reflétant la performance maximale aérobie, ont été recueillis :  $\dot{V}O_{2max}$ , la PMA ou la VMA (vitesse maximale aérobie).

##### - $\dot{V}O_{2max}$ , PMA, VMA

La  $\dot{V}O_{2max}$  correspond à la quantité maximale d'oxygène qu'un organisme peut prélever par son système respiratoire, faire diffuser jusqu'à ses capillaires pulmonaires, fixer sur son hémoglobine, transporter par son système cardiovasculaire, faire diffuser sur la myoglobine dans ses muscles squelettiques et utiliser par ses mécanismes oxydatifs, par unité de temps. À l'effort, la  $\dot{V}O_2$  doit augmenter pour adapter les apports en oxygène aux besoins des muscles squelettiques actifs. Au-delà d'un certain niveau d'effort, (appelé PMA ou VMA), la  $\dot{V}O_2$  ne peut plus augmenter malgré l'incrément de la puissance ; il s'agit de la  $\dot{V}O_{2max}$ .

En valeur absolue, la  $\dot{V}O_2$  s'exprime en ml/min. Elle est souvent rapportée au poids corporel (ml/min/kg) car la  $\dot{V}O_2$  est proportionnelle à la masse musculaire sollicitée, permettant ainsi une comparaison interindividuelle.

Nous avons donc utilisé ce critère là pour évaluer les capacités physiques aérobiques du sportif. En effet, l'entraînement régulier, surtout dynamique par les adaptations cardiovasculaires et musculaires qu'il induit, améliore la  $\dot{V}O_{2max}$ , quel que soit l'âge et le niveau physique. Par rapport aux valeurs des sédentaires sains, une augmentation de 20, 40 et 60% pour respectivement 2-4, 4-6 et plus de 6h d'entraînement hebdomadaires est classiquement observée (18).

##### - *Réalisation pratique en laboratoire de l'EFX*

Le laboratoire d'ergométrie doit être spacieux et bien ventilé pour que la composition de l'air inspiré soit proche des normes avec une température entre 15 et 25°C. Au minimum deux personnes, dont un médecin, doivent être présentes lors du test. Un matériel de réanimation en état de marche doit être aisément accessible. Une calibration journalière de l'ergospiromètre est réalisée afin d'obtenir des résultats les plus justes possible. Le volume de

l'espace mort, qui dépend du type et de la taille du matériel de recueil des gaz expirés (masque dans notre cas), a été intégré dans l'ergospiromètre. La qualité d'acquisition des autres paramètres ; ECG, pression artérielle (PA), saturation en oxygène (SaO<sub>2</sub>) est également vérifiée avant chaque test.



**Salle d'EFX – CHU Grenoble Hôpital Sud**

A l'arrivée du patient dans le service, une information claire et intelligible sur le déroulement du test est fournie aux athlètes et leur consentement à l'examen est recueilli. Un entretien est ensuite réalisé avec un médecin durant lequel nous interrogeons l'athlète sur ses antécédents, ses éventuels traitements (notamment ceux pouvant influencer sur l'interprétation des résultats), l'horaire de la dernière prise alimentaire, sa charge d'entraînement et l'éventuelle présence de symptômes au repos ou à l'effort. Un examen clinique, la vérification de l'absence de contre-indication à l'épreuve d'effort cardiorespiratoire (*tableau 2*) ainsi qu'un ECG sont réalisés.



**Tableau 2 : Contre-indications à l'épreuve d'effort selon la Société Française de Cardiologie (19).**

CI absolues	SCA ST+ ou ST- (< 2 jours) Trouble du rythme sévère ou mal toléré Obstruction sévère ou symptomatique à l'éjection ventriculaire gauche Insuffisance cardiaque décompensée Thrombose veineuse aiguë avec ou sans embolie pulmonaire Myocardite, péricardite ou endocardite aiguës Dissection aortique aiguë Thrombus intra-cardiaque à haut risque emboligène Incapacité à effectuer un exercice physique Refus du patient
CI relatives <sup>a</sup>	Sténose significative du tronc commun Anévrisme ventriculaire Tachycardia supra-ventriculaire avec fréquence ventriculaire mal contrôlée Bloc acquis de haut degré ou complet AVC ou AIT récents Cardiomyopathie obstructive avec gradient de repos élevé Etat clinique mal contrôlé, telles qu'une anémie marquée, trouble électrolytique significatif, une hyperthyroïdie... Manque de coopération de la part du patient PA > 200/110 mmHg (voire moins selon l'âge du patient)

CI : contre-indications ; PA : Pression artérielle ; SCA : syndrome coronarien aiguë avec ou sans sus-décalage du ST ; AVC : accident vasculaire cérébral ; AIT : accident ischémique transitoire

<sup>a</sup> A la discrétion du cardiologue.

Avant le début de l'EFX, le patient est pesé, mesuré et une pression artérielle de repos est mesurée. Un monitoring de l'ECG (12 dérivations) est effectif pendant l'EFX. La surveillance de l'ECG présente trois intérêts : le calcul précis de la fréquence cardiaque, l'analyse de la repolarisation (segment ST) et la détection d'éventuelles arythmies.

Afin d'obtenir des valeurs les plus fiables possibles nous avons demandé à nos sportifs de parler le moins possible sauf urgence et de communiquer plutôt avec des signes pendant l'EFX. Un masque est placé sur leur visage et l'étanchéité est vérifiée afin d'éviter les fuites qui peuvent survenir, en particulier en fin d'effort si le sujet baisse la tête.

Nous avons utilisé un protocole triangulaire (ou continu) avec une augmentation régulière de la charge imposée par paliers d'une minute. Le but étant d'obtenir une durée d'épreuve comprise entre 10 et 20 minutes. En effet, une durée plus courte ne permet pas l'utilisation optimale du système aérobie et une durée prolongée risque de limiter la performance en raison de la fatigue. À la fin de l'effort, lors d'une phase de récupération, nous continuons l'enregistrement cardiaque pendant au moins 6 minutes et effectuons un prélèvement sanguin veineux au doigt entre 2 et 4 minutes de la récupération pour obtenir la lactatémie.

Les EFX sont réalisés soit sur ergocycle soit sur tapis selon la préférence de l'athlète. À noter qu'une épreuve sur tapis majore de 10% la  $\dot{V}O_{2max}$  (18). De plus cette dernière sera plus élevée en cas d'incrémentations de pente pendant le test. Nous avons utilisé des protocoles différents adaptés au niveau et le type de pratique sportive de l'athlète.

Enfin nous avons pris le parti de laisser le sportif décider de la fin de son épreuve d'effort sauf apparition de signes de mauvaise tolérance (*tableau 3*).

**Tableau 3 : Critères d'arrêt des tests d'effort (19).**

Critères absolus	Angor sévère Diminution ou absence d'augmentation de la TA malgré l'augmentation de la charge Sus-décalage du segment ST (en dehors d'un territoire infarci) Arythmies sévères ou mal tolérées : tachycardie ventriculaire, fibrillation ventriculaire, bloc auriculo-ventriculaire du deuxième ou du troisième degré (complet) Signes de bas débit cardiaque : pâleur, extrémités froides, cyanose, faiblesse, vertiges Signes neurologiques : ataxie, confusion, vertiges, etc. Problèmes techniques qui empêchent une surveillance adéquate (ECG, PA) Demande du patient
Critères relatifs <sup>a</sup>	Douleur thoracique qui s'aggrave Sous-décalage du segment ST $\geq 2$ mm ou descendant Fatigue ou essoufflement Auscultation pulmonaire anormale (crépitaux, sibillants) Douleur des membres inférieurs ou incapacité à poursuivre l'exercice PA $\geq 250/115$ mmHg Arythmies moins sévères et bien tolérées : ESV fréquentes et polymorphes, tachycardia supra-ventriculaire, bradycardie Bloc de branche

PA : pression artérielle ; ESV : extrasystoles ventriculaires

<sup>a</sup> A la discrétion du cardiologue

Durant l'effort nous avons recueilli certains critères de maximalité afin de juger de la qualité de l'épreuve. Il s'agissait de la présence d'un plateau persistant de  $\dot{V}O_2$  malgré deux incrémentations de puissance, l'atteinte de la fréquence cardiaque maximale théorique (FMT), l'absence de réserve ventilatoire ( $VE_{max}$  proche ou dépassant la valeur de  $VE_{max}$  théorique), une lactatémie en fin d'épreuve  $\geq 8$  mmol/L et enfin une hyperventilation importante (définie comme un rapport d'échanges respiratoires ; RER  $\geq 1,2$ ) (20).

## 5) Travail myocardique à l'effort

Pendant la période de l'étude, chez cinq athlètes d'endurance masculins, une échographie de repos et d'effort (selon les mêmes critères que cités précédemment), avait été réalisée avec le calcul des différents paramètres du travail myocardique. Afin d'étudier

l'évolution du travail myocardique à l'effort, les données obtenues chez ces athlètes, ont été inclus dans l'étude.

Ces cinq athlètes ont bénéficié d'une EFX sur cycloergomètre pour estimer leur capacité physique en utilisant un protocole triangulaire identique pour les 5 athlètes : 6 minutes d'échauffement, 2 minutes à 150 watts, 2 minutes à 200 watts, 2 minutes à 250 watts, puis par palier de 25 watts toutes les minutes jusqu'à épuisement du sportif. Enfin quelques jours après l'EFX, ils ont tous bénéficié d'une échographie d'effort. L'échographie d'effort consiste à coupler une épreuve d'effort et une échographie transthoracique afin d'étudier le cœur à l'effort. Le protocole d'échographie d'effort utilisé était le suivant :

- Un monitoring ECG est réalisé tout au long du test. La pression artérielle est mesurée au repos, puis à chaque palier d'effort.
- Le test est réalisé sur une table cycloergométrique (pédalage en position semi-assise avec légère inclinaisons latérale gauche) avec une cadence de pédalage autour de 65 tours/min afin d'obtenir des images échographiques de bonne qualité.
- Trois vues échographiques (les vues apicales 4, 2 et 3 cavités), et pour chaque vue, 2 cycles cardiaques, sont enregistrés. Les vues ont systématiquement été réalisées au repos, à 50 watts, 100 watts, 150 watts et 200 watts ainsi qu'à la récupération. Un seuil maximal de 200 watts, sous maximal, permet une meilleure acquisition des images.

Nous avons à posteriori calculé le travail myocardique à 50 watts, 100 watts, 150 watts, 200 watts ainsi qu'à la récupération en appliquant le STRAIN aux images enregistrées, associé à la pression artérielle prise parallèlement.



Échographie d'effort – CHU Grenoble Hôpital Sud

## 6) Analyses statistiques

Les variables continues ont été rapportées en moyenne  $\pm$  écart type (ET) ou médiane [25-75<sup>ème</sup> percentiles] en fonction du caractère normal ou non de la distribution des données, qui a été évaluée à l'aide d'un test de Shapiro-Wilk. Les variables continues ont été comparées, entre les groupes de sportifs « sport d'endurance » et « sports mixtes », à l'aide d'un test t de Student ou un test de Mann-Withney, en fonction de la distribution des données, dans la population masculine et dans la population féminine. L'association statistique entre la  $\dot{V}O_{2max}$  (variable dépendante) et travail myocardique au repos (variables explicatives) a été testé en réalisant des analyses en régression linéaire simple.

Pour le sous-groupe de participants ayant bénéficiés d'une échographie à l'effort, les variations des mesures échographiques réalisées à l'effort au cours du temps ont été analysées par une analyse de variance (ANOVA) pour mesure répétées à 1 facteur. L'hypothèse de sphéricité a été vérifiée en utilisant un test de Mauchly ; en cas de violation de l'hypothèse de sphéricité, une correction de Greenhouse-Geisser a été appliquée. En cas de test global significatif, des tests post-hoc ont été réalisés, entre le T0 (mesure de repos) et les valeurs mesurées à l'effort en utilisant un test de Dunnett.

Toutes les analyses statistiques ont été avec le logiciel R, version 4.2.2 pour MacOS, sous licence publique générale GNU (La Fondation R pour le calcul statistique, VienAutricheiche) ou le logiciel GraphPad Prism version 9.0.2 (GraphPad Software, San Diego, CA, USA). Tous les tests statistiques étaient bilatéraux, et une valeur de  $p < 0,05$  a été considérée comme statistiquement significative.

## 7) Variabilité de la mesure du travail myocardique

Afin d'évaluer la variabilité inter-observateur de la mesure du travail myocardique nous avons demandé à deux observateurs de réaliser une mesure du STRAIN global, de l'indice de travail myocardique, du travail perdu, et du travail constructif sur vingt participants tirés au sort, en aveugle des résultats de l'autre observateur. Pour chaque paramètre, une analyse de Bland-Altman (biais de mesure  $\pm$  ET, limites de concordance) a été réalisée et un coefficient de corrélation intra-classe (CCI) avec son intervalle de confiance à 95% a été calculé (*tableau 4*).

**Tableau 4 : Accord inter observateur pour la mesure du STRAIN et travail myocardique.**

Variable	Bland-Altman		Coefficient de corrélation intra-classe	
	Biais ± ET	Limites de concordance	ICC	95% CI
STRAIN (%)	0 ± 1	-2 à 2	0,85	0,65 à 0,94
Indice de travail myocardique (mmHg%)	52 ±153	-248 à 353	0,91	0,79 à 0,96
Travail constructif ((mmHg%)	31 ±149	-260 à 322	0,87	0,70 à 0,95
Travail perdu (mmHg%)	-14 ± 51	-114 à 86	0,54	0,14 à 0,79

Nous avons ainsi observé un faible biais de mesure et une excellente reproductibilité de mesure entre les deux observateurs concernant la mesure du STRAIN et de l'indice de travail myocardique. La concordance de la mesure du travail perdu était cependant faible entre les deux observateurs (21).

## **V. RÉSULTATS**

Durant la période de l'étude, 193 athlètes étaient éligibles à une inclusion (figure 4). Parmi eux, 67 athlètes pratiquaient un sport d'endurance et 126 athlètes pratiquaient un sport mixte. Quinze athlètes ont été exclus du fait de leur âge (< 16 ans ou > 50 ans) ou du fait de la présence d'une cardiopathie sous-jacente (cardiomyopathie hypertrophique). Au total, 62 sportifs d'endurance et 116 sportifs mixtes ont été inclus dans l'étude.

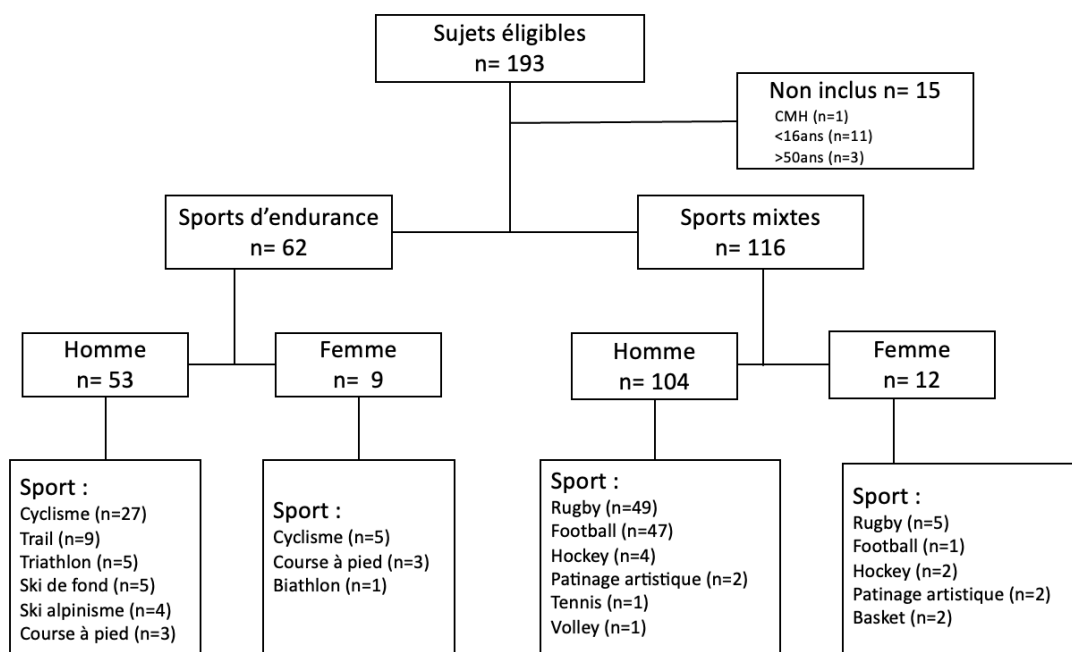


Figure 4 : Diagramme de flux de la population utilisée.

## 1) Caractéristiques de la population

### a. Athlètes masculins

Les caractéristiques anthropométriques, cliniques ainsi que les performances à l'effort de la population masculine sont regroupées dans le tableau 5. Les athlètes pratiquant un sport d'endurance avaient un IMC plus faible comparativement à ceux pratiquant un sport mixte avec cependant une  $\dot{V}O_{2max}$  et une PMA nettement supérieure.

**Tableau 5 : Caractéristiques des athlètes masculins.**

	<b>Total (n=157)</b>	<b>Sportifs d'endurance (n=53)</b>	<b>Sportifs « mixte » (n=104)</b>	<b><i>p</i></b>
Âge (années)	23 [20 - 28]	25 [19 – 31]	23 [20 - 27]	0,11

Poids (kg)	80,4 ± 16,0	66,7 ± 6,4	87,4 ± 14,8	<0,001
Taille (cm)	181,2 ± 7,5	177,5 ± 5,8	183,1 ± 7,6	<0,001
IMC (kg/m <sup>2</sup> )	24,4 ± 3,9	21,2 ± 1,8	26,0 ± 3,6	<0,001
Fréquence cardiaque (bpm)	59 ± 10	58 ± 10	59 ± 11	0,41
Pression artérielle systolique (mmHg)	128 [121 - 134]	126 [119 - 131]	129 [123 - 135]	0,009
Pression artérielle diastolique (mmHg)	67 [63 - 72]	66 [61 - 73]	68 [63 - 72]	0,64
ṂO <sub>2max</sub> (ml/min/kg)	58,0 ± 13,2	71,8 ± 11,2	52,6 ± 9,5	<0,001
PMA (watts)	360 [320 - 400]	375 [350-425]	320 [320-360]	<0,001
<b>Données présentées en moyenne ± ET ou médiane [25<sup>ème</sup>-75<sup>ème</sup> percentiles].</b> IMC, indice de masse corporelle ; ṂO <sub>2max</sub> , consommation maximale d'oxygène, PMA, puissance maximale aérobie.				

Les principaux paramètres échographiques de repos mesurés sont regroupés dans le tableau 6. Les athlètes pratiquant un sport dit mixte présentaient un volume télédiastolique VG et une surface ventriculaire droite plus élevés, des oreillettes droites plus petites ainsi qu'un volume d'éjection systolique plus petit que les athlètes d'endurance. Cependant il n'était pas retrouvé de différence en termes de masse ventriculaire gauche.

**Tableau 6 : Caractéristiques échographiques des athlètes masculins.**

	<b>Total (n=157)</b>	<b>Sportifs d'endurance (n=53)</b>	<b>Sportifs "mixte" (n=104)</b>	<b>p</b>
STRAIN VG (%)	-18,4 ± 2,0	-18,9 ± 2,0	-18,1 ± 2,0	0,02
SIVd (mm)	10,0 [9,0 - 11,0]	10,0 [9,0 - 11,0]	10,0 [9,0 - 11,0]	0,12
DTD VG (mm)	54,0 [51,0 - 56,0]	53,0 [49,0 - 54,0]	54,0 [52,0 - 57,0]	0,003

PPVGd (mm)	10,0 [9,00 – 11,0]	10,0 [9,0 -11,0]	10,5 [9,0 – 11,0]	0,13
DTS VG (mm)	35,0 [33,0 – 37,0]	34,0 [33,0 – 36,0]	35,0 [33,0 – 38,0]	0,06
FR VG (%)	34 [32 – 38]	34 [32 – 38]	33 [32 – 38]	0,80
Masse VGd indexé (g/m <sup>2</sup> )	104,7 [93,6 – 118,7]	111,9 [94,5 – 123,2]	102,8 [92,7 – 114,2]	0,06
Épaisseur relative de la paroi	0,4 [0,3 - 0,4]	0,4 [0,3 – 0,4]	0,4 [0,3 - 0,4]	0,93
VTD VG (ml)	139,0 [123,0 -154,0]	135,0 [114,0 -144,0]	144,0 [127,8 – 157,3]	0,004
VTS VG (ml)	51,0 [44,0 – 58,3]	48,0 [43,0 – 54,0]	52,0 [44,5 – 60,0]	0,03
FEVG (%)	62 [58 – 68]	63 [58 - 68]	61 [59 - 68]	0,76
Volume d'éjection systolique (ml)	87,0 [74,0 – 100,0]	82,0 [72,0 – 98,0]	92,0 [78,0 – 103,0]	0,02
Onde E (m/s)	0,8 [0,8 - 0,9]	0,8 [0,8 - 0,9]	0,8 [0,7 - 0,9]	0,61
Onde A (m/s)	0,5 [0,4 - 0,6]	0,5 [0,4 – 0,6]	0,5 [0,5 - 0,6]	0,24
E/A	1,6 [1,3 – 2,0]	1,6 [1,3 - 2,1]	1,6 [1,4 - 2]	0,59
Onde E' (m/s)	0,16 [0,14 - 0,19]	0,17 [0,15 – 0,20]	0,15 [0,13 - 0,18]	0,002
E/E'	5,1 [4,5 – 6,4]	4,8 [4,4 - 5,9]	5,3 [4,6 - 6,7]	0,02
Volume OG (ml/m <sup>2</sup> )	33,6 [28,8 – 41,1]	37,4 [29,7 – 45,6]	32,7 [28,5 – 40,4]	0,12
Volume OD (ml/m <sup>2</sup> )	31,0	35 ,0	29,9	0,001

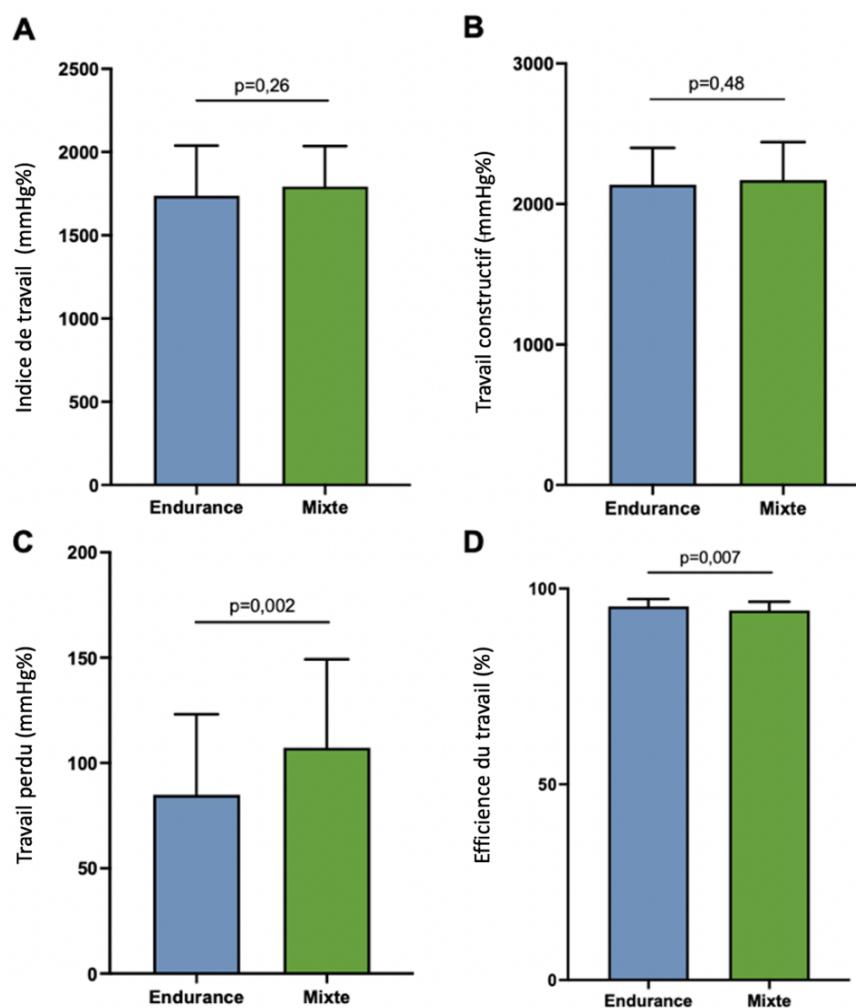


	[25,0 – 36,0]	[29,0 – 41,0]	[24,8 – 34,0]	
PAPs (mmHg)	23,9 [21,0 – 26,9]	23,7 [20,0 – 26,7]	24,0 [21,3 – 26,9]	0,46
Onde S' (cm/s)	14,2 [13,0 – 16,0]	14,0 [13,0 – 16,0]	14,4 [13,0 – 16,0]	0,73
Surface VDs (ml)	13,3 [11,4– 15,0]	12,3 [10,8 – 14,4]	13,7 [11,9 – 15,0]	0,03
Surface VDd (ml)	23,9 [20,8 – 26,8]	22,7 [19,8 – 27,2]	24,5 [21,4 – 27,2]	0,02
FR VD (%)	45 [40 – 49]	45 [38 - 48]	45 [41 - 49]	0,36
STRAIN VD (%)	-20,8 ± 2,4	-21,3 ± 2,7	-20,5 ± 2,2	0,12
<b>Données présentées en moyenne ± ET ou médiane [25<sup>ème</sup>-75<sup>ème</sup> percentiles].</b>				
SIVd, septum inter-ventriculaire en diastole ; DTD, diamètre télédiastolique ; PPVGd, paroi postérieure du VG en diastole ; DTS, diamètre télésystolique ; FR, fraction de raccourcissement ; VTD, volume télédiastolique ; VTS, volume télésystolique ; FEVG, fraction d'éjection du VG ; OG, oreillette gauche ; OD, oreillette droite ; PAPs, pression systolique dans l'artère pulmonaire ; VDs, ventricule droit en systole ; VDd, ventricule droit en systole.				

Les valeurs des différentes composantes du travail myocardique entre groupe « endurance » et « mixte » sont présentés dans le tableau 7 et la figure 5. Les athlètes hommes pratiquant un sport d'endurance présentait un STRAIN VG plus élevés (tableau 6), un travail myocardite perdu plus faible (figure 5C) et une efficacité myocardite plus élevée (figure 5D) en comparaison aux athlètes de sports mixtes.

**Tableau 7 : Travail myocardique dans les groupes « endurance » et « mixte » » chez les athlètes masculins.**

	<b>Total (n=157)</b>	<b>Sportifs d'endurance (n=53)</b>	<b>Sportifs « mixte » (n=104)</b>	<b>P</b>
Travail constructif (mmHg%)	1776 ± 261	1742 ± 297	1794 ± 242	0,26
Efficacité du travail myocardique (%)	94,8 ± 2,2	95,4 ± 1,9	94,4 ± 2,2	0,007
Indice de travail myocardique (mmHg%)	2159 ± 268	2138 ± 262	2170 ± 261	0,48
Travail perdu (mmHg%)	99,8 ± 42,0	84,8 ± 38,3	107,3 ± 42,0	0,002
<b>Données présentées en moyenne ± ET.</b>				



**Figure 5** : Comparaison du travail myocardique chez les hommes entre athlètes pratiquant un sport d’endurance (en bleu) et athlètes pratiquant un sport mixte (en vert) ; indice de travail myocardique (A), travail constructif (B), travail perdu (C), efficacité myocardique (D).

### b. Athlètes féminines

Les caractéristiques anthropométriques, cliniques ainsi que les performances à l’effort de la population sont regroupées dans le tableau 8. Le groupe endurance présentait un indice de masse corporelle et une fréquence cardiaque plus faible que le groupe « mixte » avec une  $\dot{V}O_{2max}$  et une PMA plus élevée.

**Tableau 8 : Caractéristiques des athlètes féminines.**

	<b>Total (n=21)</b>	<b>Sportives d'endurance (n=9)</b>	<b>Sportives "mixte" (n=12)</b>	<b>p</b>
Âge (années)	21 [17 - 23]	22 [21 - 24]	20 [16 - 22]	0,22
Poids (kg)	65,0 ± 14,1	57,8 ± 9,1	70,3 ± 15,0	0,04
Taille (cm)	167,4 ± 8,2	166,2 ± 8,5	168,3 ± 8,3	0,57
IMC (kg/m <sup>2</sup> )	23,0 ± 3,8	20,8 ± 1,7	24,7 ± 4,2	0,02
Fréquence cardiaque (bpm)	60 ± 12	52 ± 10	67 ± 10	0,002
Pression artérielle systolique (mmHg)	122 [118 - 125]	123 [121 - 131]	119 [118 - 123]	0,15
Pression artérielle diastolique (mmHg)	68 [63 - 72]	73 [68 - 76]	63 [60 - 69]	0,004
VO <sub>2</sub> max (ml/min/kg)	42,3 ± 10,6	53,5 ± 10,6	38,5 ± 8,2	0,08
PMA (watts)	245 [210 - 280]	280 [263 - 310]	210 [210 - 221]	0,006

**Données présentées en moyenne ± ET ou médiane [25<sup>ème</sup>-75<sup>ème</sup> percentiles].**

IMC ; indice de masse corporelle ; VO<sub>2</sub>max, consommation maximale d'oxygène, PMA, puissance maximale aérobie.

Les principaux paramètres échographiques de repos sont regroupés dans le tableau 9. Les sportives pratiquant un sport d'endurance avaient une masse ventriculaire gauche et un volume d'oreillettes plus important que le groupe sport « mixte ».

**Tableau 9 : Caractéristiques échographiques des athlètes féminines.**

	<b>Total (n=21)</b>	<b>Sportives d'endurance (n=9)</b>	<b>Sportives "mixte " (n=12)</b>	<b>P</b>
STRAIN VG (%)	-19,4 ± 2,2	-19,7 ± 2,0	-19,2 ± 2,4	0,60

SIVd (mm)	8,0 [8,0, 9,3]	9,0 [8,0 - 10,3]	8,0 [8,0 - 9,0]	0,20
DTD VG (mm)	49,0 [145,8 – 51,0]	49,0 [45,8 – 51,3]	49,0 [46,5 – 51,0]	0,91
PPVGd (mm)	9,0 [8,0 – 10,0]	9,0 [9,0 – 10,0]	9,0 [8,0 - 9,3]	0,26
DTS VG (mm)	32,0 [31,0 – 38,5]	32,0 [31,0 – 38,5]	33,0 [30,5 – 36,5]	0,71
FR VG (%)	31 [29 – 36]	30 [28 – 33]	34 [30 - 36]	0,48
Masse VGd indexé (g/m <sup>2</sup> )	89,0 [78,2 – 98,1]	96,6 [93,8 - 114,1]	81,4 [72,0 – 88,5]	0,04
Épaisseur relative de la paroi	0,4 [0,4 – 0,4]	0,4 [0,4 – 0,4]	0,4 [0,4 – 0,4]	0,26
VTD VG (ml)	112,0 [97,0 – 124,0]	113,0 [97,0 – 124,3]	111,5 [99,5 – 124,0]	0,85
VTS VG (ml)	41,0 [37,5 – 63,0]	40,5 [37,8 – 63,5]	44,0 [36,5 – 55,0]	0,74
FEVG (%)	60 [56 – 65]	59 [56 – 60]	63 [57 – 66]	0,45
Volume d'éjection systolique (ml)	70,0 [61,1 – 78,3]	63,0 [58,0 – 79,0]	71,0 [63,5 – 78,0]	0,57
Onde E (cm/s)	0,9 [0,8 - 1,1]	0,9 [0,8 - 0,9]	1,0 [0,9 - 1,1]	0,29
Onde A (cm/s)	0,5 [0,5 - 0,6]	0,5 [0,4 - 0,6]	0,6 [0,5 - 0,6]	0,43
E/A	1,8 [1,5 – 2,1]	1,9 [1,7 – 2,1]	1,6 [1,5 – 1,8]	0,20
Onde E' (cm/s)	0,2 [0,2 – 0,2]	0,2 [0,2 – 0,2]	0,2 [0,2 – 0,2]	1,00
E/E'	5,2	4,9	5,4	0,76

	[4,8 – 5,8]	[4,8 – 5,8]	[4,8 - 5,7]	
Volume OG (ml/m <sup>2</sup> )	31,2 [26,4 – 39,7]	37,1 [30,2 – 53,5]	26,6 [25,0 – 33,2]	0,03
Volume OD (ml/m <sup>2</sup> )	22,8 [21,0 – 28,3]	24,5 [21,2 – 37,1]	22,0 [18,0 – 23,8]	0,08
PAPs (mmHg)	22,8 [20,5 – 24,8]	24,2 [23,0 – 26,4]	21,0 [18,4 – 22,8]	0,04
Onde S' (cm/s)	14,0 [13,5 – 16,0]	13,5 [13,0 – 14,0]	14,2 [14,0 - 16,3]	0,18
Surface VDs (cm <sup>2</sup> )	9,7 [7,7 – 11,4]	10,5 [9,2 – 11,4]	9,0 [7,7 – 11,5]	0,52
Surface VDd (cm <sup>2</sup> )	18,1 [16,1 – 22,0]	17,8 [17,6 – 23,1]	18,3 [15,2 – 20,7]	0,27
FR VD (%)	49 [43,0 - 52,3]	49 [45 – 51]	48 [42 - 53]	0,59
STRAIN VD (%)	-20,7 ± 2,5	-20,7 ± 2,7	-20,6 ± 2,6	0,96

**Données présentées en moyenne ± ET ou médiane [25ème-75ème percentiles].**

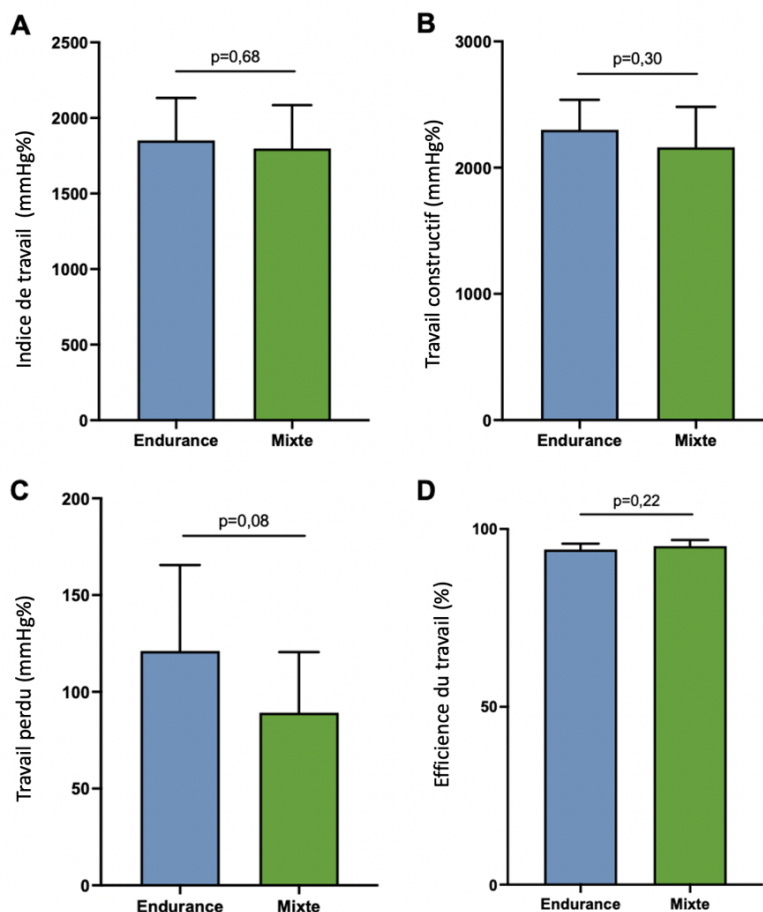
SIVd, septum inter-ventriculaire en diastole ; DTD, diamètre télédiastolique ; PPVGd, paroi postérieure du VG en diastole ; DTS, diamètre télésystolique ; FR, fraction de raccourcissement ; VTD, volume télédiastolique ; VTS, volume télésystolique ; FEVG, fraction d'éjection du VG ; OG, oreillette gauche ; OD, oreillette droite ; PAPs, pression systolique dans l'artère pulmonaire ; VDs, ventricule droit en systole ; VDd, ventricule droit en systole.

Les valeurs et la comparaison des différentes composantes du travail myocardique entre groupe « endurance » et « mixte » chez les femmes sont présentés sur le tableau 10 et la figure 6. On ne retrouvait pas de différence significative entre les deux groupes.

**Tableau 10** : Travail myocardique dans les groupes « endurance » et « mixte » chez les athlètes féminines.

	Total (n=21)	Sportives d'endurance (n=9)	Sportives "mixte" (n=12)	<i>p</i>
Travail constructif (mmHg%)	1822 ± 278	1851 ± 281	1798 ± 287	0,68
Efficiencce du travail myocardique (%)	94,8 ± 1,7	94,2 ± 1,6	95,2 ± 1,7	0,22
Indice de travail myocardique (mmHg%)	2223 ± 288	2300 ± 239	2161 ± 321	0,30
Travail perdu (mmHg%)	103,6 ± 40,1	121,1 ± 44,4	89,3 ± 31,3	0,08

**Données présentées en moyenne ± ET.**



**Figure 6** : Comparaison du travail myocardique chez les femmes entre athlètes pratiquant un sport d'endurance et athlètes pratiquant un sport mixte ; indice de travail myocardique (A), travail constructif (B), travail perdu (C), efficiencce myocardique (D).

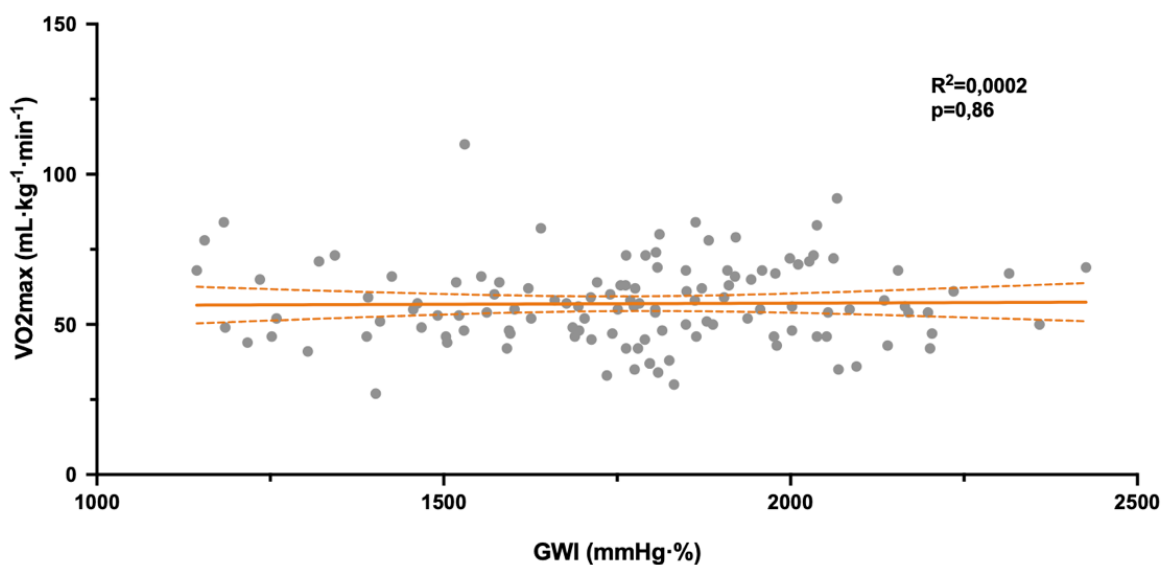
## 2) Relation entre travail myocardique au repos et performance à l'effort

Les valeurs recueillies lors des EFX des athlètes d'endurance et ceux pratiquant un sport dit « mixte » sont regroupées dans le tableau 11. Les athlètes d'endurance présentent des  $\dot{V}O_{2max}$ , une PMA, une VMA plus élevées que les athlètes « mixtes ». De plus, le groupe d'endurance tend davantage à respecter les critères de maximalité (pourcentage de la FMT, réserve ventilatoire).

**Tableau 11 : Données des EFX des athlètes (hommes et femmes).**

	<b>Athlètes d'endurance</b> <b>n=62</b>	<b>Athlètes « mixte »</b> <b>n=116</b>	<b>p</b>
$\dot{V}O_{2max}$ (ml/min/kg)	70,0 ± 11,7	51,7 ± 10,0	<0,001
PMA (watts)	363 ± 69	313 ± 59	<0,001
VMA (km/h)	18,5 ± 5,0	16,3 ± 1,6	0,65
% FMT	96 ± 4	94 ± 6	0,02
Réserve ventilatoire (%)	-8,9 ± 14,6	6,4 ± 15,4	<0,001
RER	1,08 ± 0,11	1,10 ± 0,11	0,41

**Données présentées en moyenne ± ET.**  
 $\dot{V}O_{2max}$ , consommation maximale d'oxygène ; PMA, puissance maximale aérobie ; FMT, fréquence cardiaque maximale théorique ; RER, rapport d'échanges respiratoires.



**Figure 7 :** Régression linéaire entre indice de travail myocardique (abscisse) et  $\dot{V}O_{2max}$  (ordonnée).

Comme illustré dans la figure 7, il n'était pas observé d'association statistiquement significative, en régression linéaire simple, entre la  $\dot{V}O_{2max}$  et l'indice de travail myocardique, en considérant la population totale.

### 3) Travail myocardique à l'effort

Chez cinq participants de sexe masculin inclus dans notre étude, des mesures du travail myocardique avaient été réalisées à l'effort. Il s'agissait d'athlètes d'endurance (cyclistes pour quatre d'entre eux, traileur pour le dernier). Les caractéristiques de ces cinq participants sont regroupées dans le tableau 12.

**Tableau 12 : Caractéristiques des athlètes chez qui des mesures du travail myocardique ont été réalisées à l'effort.**

	<b>Total (n=5)</b>
Âge (années)	30 ± 6
Poids (kg)	68,4 ± 7,0
Taille (cm)	179,0 ± 5,7
IMC (kg/m <sup>2</sup> )	21,3 ± 1,6
$\dot{V}O_{2max}$ (ml/min/kg)	68,6 ± 3,6
PMA (watts)	370 ± 41
<b>Données présentées en moyenne ± ET.</b>	

Les données de pression artérielle au cours de l'échographie d'effort sont regroupées dans le tableau 13. Il était observé une augmentation progressive de la pression artérielle parallèlement aux watts développés par l'athlète avec une diminution rapide à la récupération.

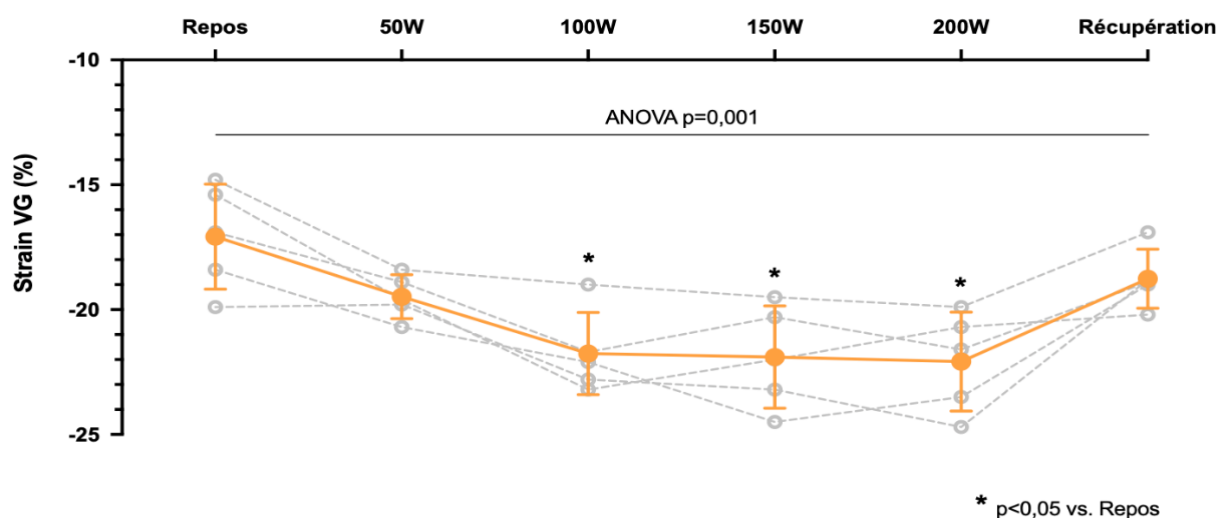


**Tableau 13 : Pression artérielle par palier d'effort.**

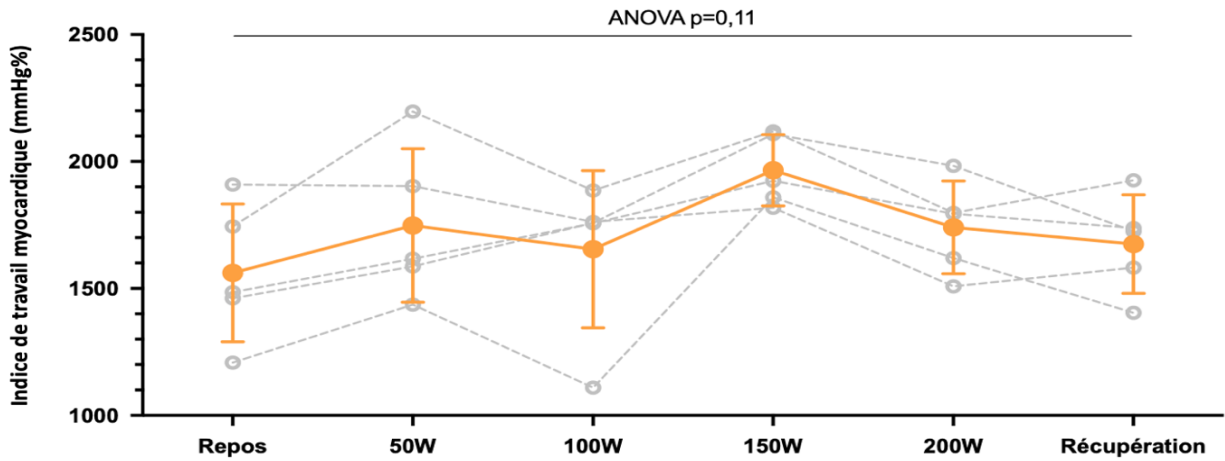
	<b>PAs (mmHg)</b>	<b>PAd (mmHg)</b>
Repos	121 ± 9	72 ± 8
Palier 1 – 50W	132 ± 8	77 ± 8
Palier 2 – 100 W	150 ± 13	79 ± 8
Palier 3 – 150W	163 ± 18	89 ± 12
Palier 4 – 200W	172 ± 12	90 ± 17
Récupération	125 ± 6	71 ± 5

**Données présentées en moyenne ± ET.**  
PAs ; pression artérielle systolique, PAd ; pression artérielle diastolique

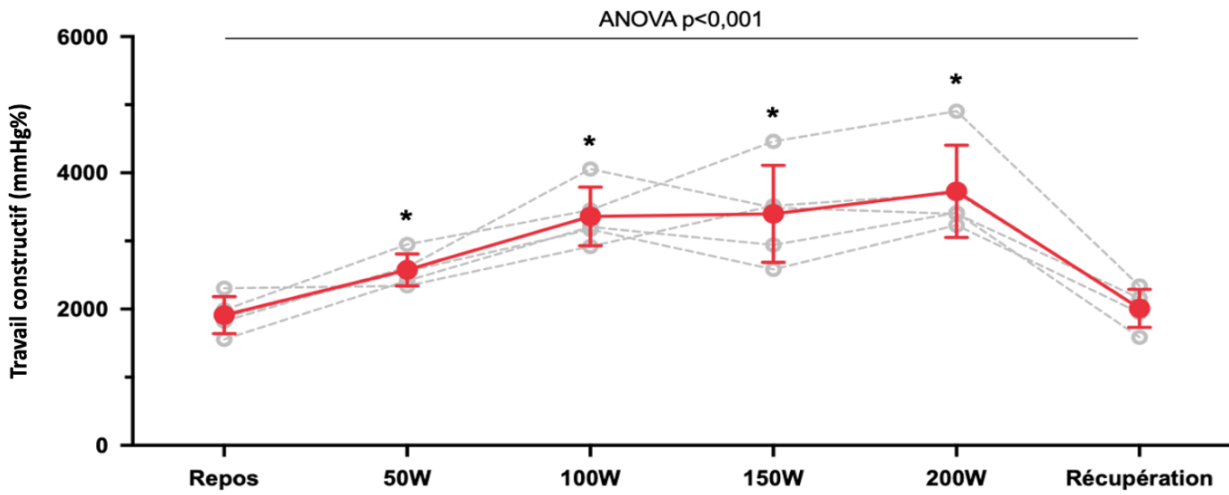
Une augmentation significative du STRAIN myocardique était observée au cours de l'effort ( $p=0,001$ , figure 8A) mais rappelons-le, ce paramètre est charge-dépendant et donc varie avec la pression artérielle. Le calcul du travail myocardique, est quant à lui indépendant des conditions de charge. On observait ainsi une augmentation significative du travail constructif ( $p<0,001$ , figure 8C) au cours de l'effort mais sans modification significative de l'indice de travail myocardique (figure 8B), du travail perdu (figure 8D) ou de l'efficacité du travail myocardique (figure 8E).



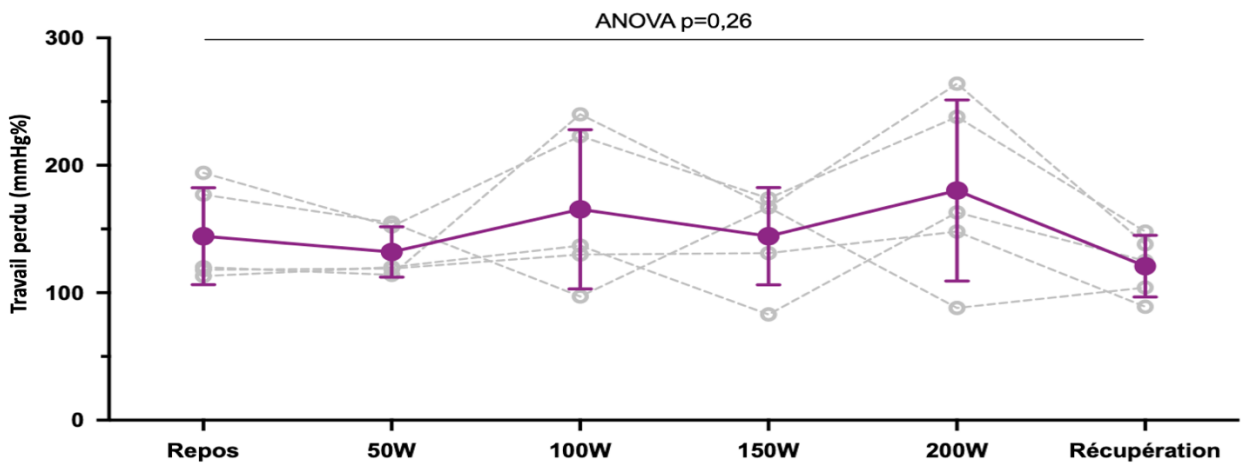
**Figure 8A :** STRAIN VG en fonction de la puissance.



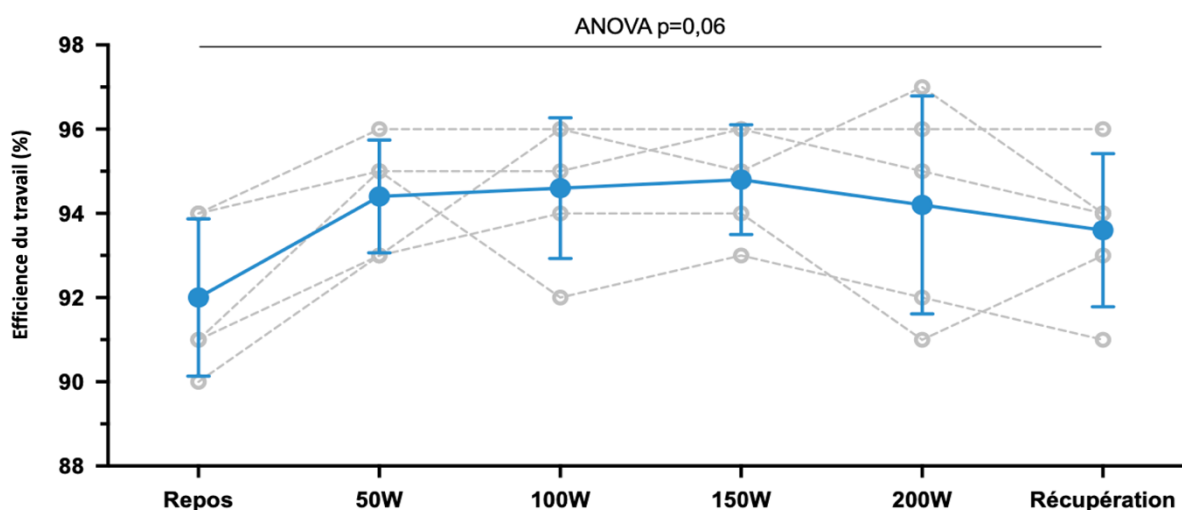
**Figure 8B** : Indice de travail myocardique en fonction de la puissance.



**Figure 8C** : Travail constructif en fonction de la puissance (\*  $p<0,05$  vs. repos).



**Figure 8D** : Travail perdu en fonction de la puissance.



**Figure 8E** : Efficience myocardique en fonction de la puissance.

## VI. DISCUSSION

### 1) Résultats principaux

Cette étude a permis d'obtenir des valeurs de travail myocardique chez des athlètes et pour la première fois, de comparer des athlètes d'endurances à des athlètes pratiquant un sport mixte. Chez les hommes, bien que l'indice de travail myocardique ne soit pas différent dans les deux populations, le travail myocardique perdu est plus faible chez eux ( $84,8 \pm 38,3\text{mmHg}\%$  vs.  $107,3 \pm 42,0\text{mmHg}\%$ ,  $p=0,002$ ) avec une meilleure efficacité myocardique ( $95,4 \pm 1,9\%$  vs.  $94,4 \pm 2,2\%$ ,  $p=0,007$ ). Ces constatations ne sont pas retrouvées chez l'athlète femme probablement du fait d'un manque de puissance en raison d'un faible effectif.

Par ailleurs, dans notre étude, incluant des athlètes entraînés, il n'était pas retrouvé de relation significative entre travail myocardique de repos et performance maximale à l'exercice, à l'inverse de ce qui avait été rapporté précédemment dans l'étude de D'Andrea et al. (13).

### 2) Forces de l'étude

Il s'agit, à notre connaissance, de la première étude s'intéressant à des athlètes de ce niveau de performance ( $\dot{V}O_{2\text{max}}$  moyenne  $70,7\text{ ml/min/kg}$  pour les endurants et  $51,7\text{ ml/min/kg}$  pour

les sports mixtes) et comparant les valeurs de travail myocardique entre deux types de sport (endurance vs. mixte).

### 3) Pertinence clinique

L'objectif premier de notre étude était de donner des valeurs de référence du travail myocardique chez les athlètes d'endurance et mixte pouvant aider au diagnostic différentiel entre cardiomyopathie et cœur d'athlète en cas de FEVG et/ou de STRAIN abaissé.

De plus le but de cette étude était d'étudier la corrélation entre travail myocardique et  $\dot{V}O_{2max}$  afin de disposer d'un paramètre supplémentaire chez l'athlète « en zone grise », c'est-à-dire ayant des paramètres standards échographiques limites, ne permettant pas d'exclure une cardiopathie débutante. Nous n'avons cependant pas pu mettre en évidence de corrélation entre travail myocardique et  $\dot{V}O_{2max}$  dans cette étude.

Enfin le travail myocardique pourrait également servir de guide dans l'entraînement de ces athlètes. En effet nous avons remarqué chez l'un de nos athlètes qui a bénéficié de l'échographie d'effort cinq jours après un trail de 80 kilomètres, qu'il avait un STRAIN global fortement diminué ainsi qu'un travail constructif et un indice de travail myocardique plus faible comparativement à l'avant effort. Un travail myocardique abaissé pourrait donc refléter / être le témoin d'une fatigue myocardique et être apparenté à un surentraînement. Cependant cela nécessiterait une surveillance échocardiographique très rapproché chez l'athlète ce qui semble peu envisageable à l'heure actuelle.

### 4) Cohérence externe

Nos données échographiques sur l'athlète d'endurance rejoignent les données de l'article de D'Andrea et al. (13). Avec notamment le STRAIN global chez nos endurants ( $-19,1 \pm 1,9$  % proche du  $-18,4 \pm 2,6$ % de D'Andrea) ou encore les paramètres de fonction diastoliques (E/A :  $1,8 \pm 0,6$  vs.  $1,7 \pm 0,5$  ou encore E/E' :  $5,1 \pm 1,2$  vs.  $4,8 \pm 0,1$ ). (*Annexe 1*)

De plus notre étude rejoint les données de travail myocardique de l'article de Galli et al. (11) sur les différences observées entre hommes et femmes. En effet nous retrouvons une tendance à avoir un indice de travail myocardique plus élevé chez la femme que chez l'homme ( $2223 \pm 288$  vs.  $2160 \pm 267$ mmHg% respectivement). Les mêmes observations sont retrouvées

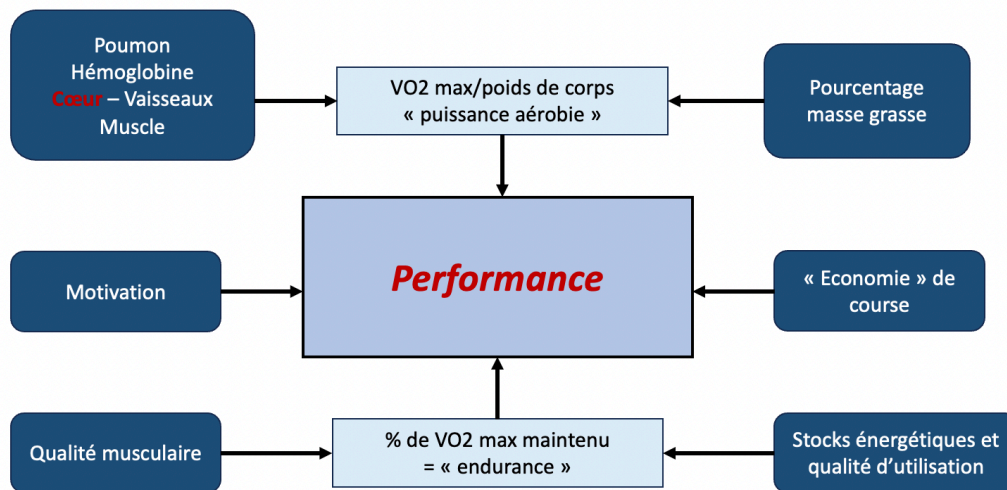
pour le travail constructif ( $1822 \pm 278\text{mmHg}\%$  chez la femme et  $1776 \pm 261\text{mmHg}\%$  pour l'homme).

Il existe dans notre étude, des incohérences avec littérature ; en effet le diamètre VG en diastole de nos athlètes d'endurance semble plus faible dans notre travail ( $51,9 \pm 4,10\text{ mm}$ ) que dans la littérature ( $56,4 \pm 5,3\text{ mm}$ ) (13). Chez les hommes, nous retrouvons également un diamètre VGd plus petit chez le sportif d'endurance que chez le sportif pratiquant un sport mixte (tableau 6) alors que la littérature plaide plutôt pour l'inverse (22). Cependant ceci peut être expliqué par l'utilisation de diamètres non indexés au poids alors que nos sportifs d'endurance ont un IMC significativement plus bas ( $p < 0,001$  ; tableau 5).

### 5) Limites de l'étude

Étant donné que le travail, par définition, est égal à la force multipliée par la longueur, l'utilisation de la pression et de la déformation ne fournit pas une mesure directe du travail, mais plutôt un indice. Cela devient un problème lorsque l'on compare le travail par analyse pression-déformation dans des ventricules de tailles différentes, comme cela peut être le cas dans le cœur d'athlète. En effet le travail est relativement sous-estimé dans le ventricule dilaté. De plus l'estimation de la pression par échocardiographie et pression artérielle du brassard ne reproduit pas les détails de la pression réelle. Une mesure plus directe du travail peut être obtenue en incorporant les dimensions VG et les rayons des segments, ce qui peut être envisageable avec l'imagerie 3D (8).

Nous avons décidé d'utiliser comme marqueur de performance la  $\dot{V}O_{2\text{max}}$  qui correspond à la puissance aérobie. Or nous savons que la performance d'un athlète dépend de d'autres paramètres tel que l'endurance qui correspond au pourcentage de  $\dot{V}O_{2\text{max}}$  que le sportif est capable de maintenir durant un temps prolongé (elle-même dépendante de la qualité musculaire, du stock énergétique et de sa qualité d'utilisation), de la motivation du sportif et de son économie de course (figure 9).



**Figure 9** : Paramètres de la performance d'un sportif. D'après Carré (23).

A noter également qu'il s'agit d'une étude monocentrique pouvant être à l'origine d'un biais de sélection par effet-centre en lien avec la région. En effet l'unité « sports et pathologies » du CHU de Grenoble suit principalement des cyclistes, coureurs et fondeurs pour les sports d'endurance et des rugby-mans, footballeurs pour les sports mixtes excluant par exemple les sports aquatiques ou de raquette.

Nous pouvons, de plus, reprocher à cette étude sa faible puissance notamment pour la sous-population féminine composée seulement de 21 femmes, pouvant expliquer l'absence de résultats significatifs dans la population féminine.

Il existe également des variabilités dans nos données du fait de l'aspect opérateur dépendant des mesures échographiques, même si nous avons tenté de les limiter en utilisant qu'un seul appareil d'échographie, seulement deux échographistes pour le recueil et une cadence image >80 images/sec. Il faut également rendre compte de la nécessité d'images nettes pour la réalisation du STRAIN et donc du travail myocardique, ce qui peut se révéler fastidieux lors d'une échographie d'effort.

## 6) Perspectives

Nous avons profité de cette étude pour étudier le travail myocardique à l'effort sur cinq athlètes. Les résultats montraient que lors d'un effort progressif sous-maximal il existait une augmentation significative du STRAIN myocardique et du travail constructif au cours de l'effort. A noter que le travail perdu n'augmentait pas au cours de l'effort ce qui est à l'origine

d'une tendance à l'augmentation de l'efficacité cardiaque sans que cela soit significatif, probablement du fait d'un manque de puissance. Il serait intéressant de confirmer ces résultats à l'effort, dans le cadre d'une étude prospective, chez des athlètes, mais également chez des sujets sédentaires en bonne santé, ou chez des patients présentant une cardiopathie. De plus, il pourrait être utile d'explorer le travail perdu sur des efforts prolongés dans le but d'essayer de quantifier la fatigue myocardique.

## **VII. CONCLUSION**

Notre étude a permis de comparer les valeurs de travail myocardique, calculées en échographie, entre des athlètes pratiquant un sport mixte et ceux pratiquant des sports d'endurance. Bien que le remodelage cardiaque anatomique et fonctionnel soit différent entre les deux types de sport, l'indice de travail myocardique n'était pas différent. En revanche, le travail dit « perdu » était plus faible et l'efficacité myocardique plus élevée. Dans une large gamme de performance, il ne semble pas y avoir d'association statistiquement significative entre travail myocardique et performance chez l'athlète entraîné. Toutefois, cette étude a permis de proposer des valeurs de référence en termes de travail myocardique chez l'athlète selon le type de sport pratiqué. La place exacte de ce paramètre dans l'évaluation du cœur d'athlète reste à déterminer.

THÈSE SOUTENUE PAR : Clémentine BALAYN

TITRE :

LE CALCUL DU TRAVAIL MYOCARDIQUE A-T-IL UN INTERET CHEZ L'ATHLETE ?

CONCLUSION :

Notre étude a permis de comparer les valeurs de travail myocardique, calculées en échographie, entre des athlètes pratiquant un sport mixte et ceux pratiquant des sports d'endurance. Bien que le remodelage cardiaque anatomique et fonctionnel soit différent entre les deux types de sport, le travail myocardique global n'était pas différent. En revanche, le travail dit « perdu » est plus faible et l'efficacité myocardique plus élevée. Dans une large gamme de performance, il ne semble pas y avoir de corrélation entre travail myocardique et performance de l'athlète. Toutefois, cette étude permet de donner des valeurs de référence en termes de travail myocardique chez l'athlète selon le type de sport pratiqué. La place exacte de ce paramètre dans l'évaluation du cœur l'athlète reste à déterminer.

VU ET PERMIS D'IMPRIMER

Grenoble, le : 18/09/23

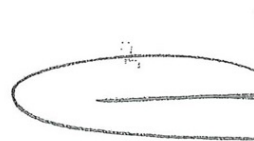
LE DOYEN DE LA FACULTÉ DE MÉDECINE



Pr Olivier PALOMBI

Pr Olivier PALOMBI  
Doyen de l'UFR de Médecine

LE PRÉSIDENT / LA PRÉSIDENTE DU JURY



Pr. G. VANZETTO  
Soins Intensifs et Urgences Cardiaques  
Clinique Universitaire de Cardiologie  
CHU de GRENOBLE  
RPPS 10002901254

Pr Gérald VANZETTO



## VIII. BIBLIOGRAPHIE

1. Baggish AL, Wood MJ. Athlete's Heart and Cardiovascular Care of the Athlete: Scientific and Clinical Update. *Circulation*. 14 juin 2011;123(23):2723-35.
2. Prior DL, La Gerche A. The athlete's heart. *Heart*. 15 juin 2012;98(12):947-55.
3. Vincent JL. Understanding cardiac output. *Crit Care*. 2008;12(4):174.
4. Lakatos BK, Kiss O, Tokodi M, Tösér Z, Sydó N, Merkely G, et al. Exercise-induced shift in right ventricular contraction pattern: novel marker of athlete's heart? *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*. 1 déc 2018;315(6):H1640-8.
5. Lakatos BK, Molnár AA, Kiss O, Sydó N, Tokodi M, Solymossi B, et al. Relationship between Cardiac Remodeling and Exercise Capacity in Elite Athletes: Incremental Value of Left Atrial Morphology and Function Assessed by Three-Dimensional Echocardiography. *Journal of the American Society of Echocardiography*. janv 2020;33(1):101-109.e1.
6. Mor-Avi V, Lang RM, Badano LP, Belohlavek M, Cardim NM, Derumeaux G, et al. Current and Evolving Echocardiographic Techniques for the Quantitative Evaluation of Cardiac Mechanics: ASE/EAE Consensus Statement on Methodology and Indications. *Journal of the American Society of Echocardiography*. mars 2011;24(3):277-313.
7. D'Andrea A, Bossone E, Radmilovic J, Caso P, Calabrò R, Russo MG, et al. The role of new echocardiographic techniques in athlete's heart. *F1000Res*. 2015;4:289.
8. Boe E, Skulstad H, Smiseth OA. Myocardial work by echocardiography: a novel method ready for clinical testing. *European Heart Journal - Cardiovascular Imaging*. 1 janv 2019;20(1):18-20.
9. Russell K, Eriksen M, Aaberge L, Wilhelmsen N, Skulstad H, Remme EW, et al. A novel clinical method for quantification of regional left ventricular pressure-strain loop area: a non-invasive index of myocardial work. *European Heart Journal*. mars 2012;33(6):724-33.
10. Chan J, Edwards NFA, Khandheria BK, Shiino K, Sabapathy S, Anderson B, et al. A new approach to assess myocardial work by non-invasive left ventricular pressure-strain relations in hypertension and dilated cardiomyopathy. *European Heart Journal - Cardiovascular Imaging*. 1 janv 2019;20(1):31-9.
11. Galli E, John-Matthwes B, Rousseau C, Schnell F, Leclercq C, Donal E. Echocardiographic reference ranges for myocardial work in healthy subjects: A preliminary study. *Echocardiography*. oct 2019;36(10):1814-24.
12. Manganaro R, Marchetta S, Dulgheru R, Ilardi F, Sugimoto T, Robinet S, et al. Echocardiographic reference ranges for normal non-invasive myocardial work indices: results from the EACVI NORRE study. *European Heart Journal - Cardiovascular Imaging*. 1 mai 2019;20(5):582-90.

13. D'Andrea A, Radmilovic J, Carbone A, Mandoli GE, Santoro C, Evola V, et al. Speckle tracking evaluation in endurance athletes: the “optimal” myocardial work. *Int J Cardiovasc Imaging*. sept 2020;36(9):1679-88.
14. Tokodi M, Oláh A, Fábíán A, Lakatos BK, Hizoh I, Ruppert M, et al. Novel insights into the athlete's heart: is myocardial work the new champion of systolic function? *European Heart Journal - Cardiovascular Imaging*. 24 janv 2022;23(2):188-97.
15. Rigamonti F. *Revue Médicale Suisse : Cœur d'athlète : frontière entre physiologie et pathologie*. Monnard S, éditeur. *Revue Médicale Suisse*. 2012;8(349):1496-500.
16. 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. *European Heart Journal*. 1 janv 2021;42(1):17-96.
17. Lang RM, Badano LP, Mor-Avi V, Afilalo J, Armstrong A, Ernande L, et al. Recommendations for Cardiac Chamber Quantification by Echocardiography in Adults: An Update from the American Society of Echocardiography and the European Association of Cardiovascular Imaging. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*. mars 2015;16(3):233-71.
18. Cohen-Solal A, Carré F. *guide pratique des épreuves d'effort cardiorespiratoires*. (ELSEVIER MASSON).
19. Marcedet DM, Carré F. *Recommandations de la Société Française de Cardiologie pour les épreuves d'effort*. 13 août 2018;
20. Aguilaniu B, Wallaert B. De l'interprétation de l'exploration fonctionnelle d'exercice (EFX) à la décision médicale. *Revue des maladies respiratoires*. 2013;30, 495-515.
21. Schober P, Mascha EJ, Vetter TR. Statistics From A (Agreement) to Z (z Score): A Guide to Interpreting Common Measures of Association, Agreement, Diagnostic Accuracy, Effect Size, Heterogeneity, and Reliability in Medical Research. *Anesthesia & Analgesia*. déc 2021;133(6):1633-41.
22. Scharhag J, Löllgen H, Kindermann W. Competitive Sports and the Heart. *Deutsches Ärzteblatt international* [Internet]. 7 janv 2013 [cité 16 sept 2023]; Disponible sur: <https://www.aerzteblatt.de/10.3238/arztebl.2013.0014>
23. Carré F. *Paramètres de la performance en endurance*. Cœur et Sport ; 2023; Marseille.

## IX. ANNEXES

### Annexe 1A : Caractéristiques des athlètes d'endurance (hommes et femmes).

	Athlètes d'endurance (n=62)
<b>Constantes</b>	
Âge (années)	24 [19 – 31]
Poids (kg)	65,5 ± 7,5
Taille (cm)	176,0 ± 7,4
IMC (kg/m <sup>2</sup> )	21,1 ± 1,8
FC (bpm)	57 ± 11
PAs (mmHg)	125 [118 – 131]
PAd (mmHg)	125 [118 – 131]
<b>Travail myocardique</b>	
CW (mmHg%)	1755 ± 294
WE (%)	95,2 ± 2,0
WI (mmHg%)	2153 ± 262
WW (mmHg%)	89,6 ± 41,6
<b>Échographie</b>	
SIVd (mm)	10,0 [9,0 -11,0]
VTD VG (mm)	52,0 [49,0 – 54,0]
PPVGd (mm)	10,0 [9,0 – 11,0]
VTS VG (mm)	34,0 [32,0 – 36,0]
FRVG (%)	34 [31 – 37]
Masse VG (g/m <sup>2</sup> )	111,8 [94,2 – 122,7]
RWT	0,4 [0,4 – 0,4]
VTD VG (ml)	130,0 [114,0 – 143,0]
VTS VG (ml)	48,0 [41,0 – 55,0]
FEVG (%)	62 [57 – 67]

VES (ml)	80,5 [68,8 – 94,8]
Onde E (cm/s)	0,9 [0,8 -0,9]
Onde A (cm/s)	0,5 [0,41 – 0,59]
E/A	1,7 [1,4 – 2,1]
E' latéral (cm/s)	0,2 [0,2 – 0,2]
E/E'	4,8 [4,5 – 5,8]
Volume OG (ml/m2)	36,5 [29,2 – 45,9]
Volume OD (ml/m2)	34,5 [25,5 – 40,8]
PAPs (mmHg)	23,7 [20,6 – 26,7]
Onde S' (cm/s)	14,0 [13,0 – 16,0]
Surface VDs (cm <sup>2</sup> )	12,0 [10,5 – 14,0]
Surface VDd (cm <sup>2</sup> )	22,7 [19,5 – 25,3]
FRVD (%)	45 [39 – 49]
STRAIN VD (%)	-21,2 ± 2,6
STRAIN VG (%)	-19,1 ± 2,0
<b>EFX</b>	
$\dot{V}O_{2max}$ (ml/min/kg)	70,0 ± 11,7
PMA (watts)	363 ± 69
VMA (km/h)	18,5 ± 5,0
% FMT	96,0 ± 4,2
Réserve ventilatoire (%)	-8,9 ± 14,6
RER	1,08 ± 0,11
<p><b>Données présentées en moyenne ± ET ou médiane [25<sup>ème</sup>-75<sup>ème</sup> percentiles].</b>  IMC, indice de masse corporelle ; PAs, pression artérielle systolique ; PAd, pression artérielle diastolique ; CW, travail constructif ; WE, efficacité de travail ; WI, index du travail ; WW, travail perdu ; GLS, Global longitudinal STRAIN ; SIVd, septum inter-ventriculaire en diastole ; DTD, diamètre télédiastolique ; PPVGd, paroi postérieure du VG en diastole ; DTS, diamètre télésystolique ; FR, fraction de raccourcissement ; VTD, volume télédiastolique ; VTS, volume télésystolique ; FEVG, fraction d'éjection du VG ; OG, oreillette gauche ; OD, oreillette droite ; PAPs, pression systolique dans l'artère pulmonaire ; VDs, ventricule droit en systole ; VDd, ventricule droit en systole ; <math>\dot{V}O_{2max}</math>, consommation maximale d'oxygène, PMA, puissance maximale aérobie ; FMT, fréquence cardiaque maximale théorique.</p>	

**Annexe 1B : Caractéristiques des athlètes pratiquant un sport mixte (hommes et femmes).**

	Athlètes pratiquant un sport mixte (n=116)
<b>Constantes</b>	
Âge (années)	22 [20 – 26]
Poids (kg)	85,6 ± 15,7
Taille (cm)	181,5 ± 8,8
IMC (kg/m <sup>2</sup> )	25,9 ± 3,7
FC (bpm)	60 ± 12
PAs (mmHg)	128 [122 – 134]
PAd (mmHg)	67 [63 – 71]
<b>Travail myocardique</b>	
CW (mmHg%)	1793 ± 246
WE (%)	94,5 ± 2,2
WI (mmHg%)	2169 ± 274
WW (mmHg%)	105,5 ± 41,3
<b>Échographie</b>	
SIVd (mm)	10,0 [9,0 - 11,0]
DTDVG (mm)	54,0 [51,0- 56,0]
PPVGd (mm)	10,0 [9,0 - 11,0]
DTS (mm)	35,0 [33,0 - 38,0]
FRVG (%)	33,5 [32,0 - 38,0]
Masse VG (g/m <sup>2</sup> )	100,7 [89,2 - 112,6]
RWT	0,4 [0,3 - 0,4]
VTD VG (ml)	142,0 [124,0 - 155,3]
VTS VG (ml)	52,0 [44,0 - 60,0]
FEVG (%)	62 [58 - 68]
VES (ml)	89,0 [75,0 - 102,8]
Onde E (cm/s)	0,8 [0,8 - 1,0]
Onde A (cm/s)	0,5 [0,5 - 0,6]

E/A	1,6 [1,4 - 2,0]
Onde E' latéral (cm/s)	0,2 [0,1 - 0,2]
E/E'	5,3 [4,6 - 6,4]
Volume OG (ml/m <sup>2</sup> )	32,6 [27,4 -40,0]
Volume OD (ml/m <sup>2</sup> )	28,0 [24,0 - 33,0]
PAPs (mmHg)	23,5 [21,0 - 26,9]
Onde S' (cm/s)	14,4 [13,0 -16,0]
Surface VDs (cm <sup>2</sup> )	13,4 [11,3 -15,0]
Surface VDd (cm <sup>2</sup> )	23,9 [21,0 - 26,9]
FRVD (%)	45,0 [41,0 - 49,0]
STRAIN VD (%)	-20,5 ± 2,3
STRAIN VG (%)	-18,3 ± 2,0
<b>EFX</b>	
VO <sub>2max</sub> (ml/min/kg)	51,7 ± 10,0
PMA (watts)	313 ± 59
VMA (km/h)	16,3 ± 1,6
% FMT	94 ± 6
Réserve ventilatoire (%)	6,4 ± 15,4
RER	1,10 ± 0,11
<p><b>Données présentées en moyenne ± ET ou médiane [25<sup>ème</sup>-75<sup>ème</sup> percentiles].</b>  IMC, indice de masse corporelle ; PAs, pression artérielle systolique ; PAd, pression artérielle diastolique ; CW, travail constructif ; WE, efficacité de travail ; WI, indice du travail ; WW, travail perdu ; GLS, Global longitudinal STRAIN ; SIVd, septum inter-ventriculaire en diastole ; DTD, diamètre télédiastolique ; PPVGd, paroi postérieure du VG en diastole ; DTS, diamètre télésystolique ; FR, fraction de raccourcissement ; VTD, volume télédiastolique ; VTS, volume télésystolique ; FEVG, fraction d'éjection du VG ; OG, oreillette gauche ; OD, oreillette droite ; PAPs, pression systolique dans l'artère pulmonaire ; VDs, ventricule droit en systole ; VDd, ventricule droit en systole ; VO<sub>2max</sub>, consommation maximale d'oxygène, PMA, puissance maximale aérobie ; FMT, fréquence cardiaque maximale théorique.</p>	

**Annexe 2 : Valeurs de référence du travail myocardique par genre et âge. D'après Galli et al. (11).**

	<25 ans	25-35 ans	35-45 ans	>45 ans
<b>Travail perdu (mmHg%)</b>				
Tous	1915 ± 233	1935 ± 220	1939 ± 289	1911 ± 251
Femme	1923 ± 276	1954 ± 109	2190 ± 206	2058 ± 275
Homme	1912 ± 217	1927 ± 255	1832 ± 252	182 ± 196
<b>Travail constructif (mmHg%)</b>				
Tous	2212 ± 276	2203 ± 220	2242 ± 250	2240 ± 230
Femme	2172 ± 238	2260 ± 267	2356 ± 207	2350 ± 306
Homme	2231 ± 217	2179 ± 200	2184 ± 250	2174 ± 145
<b>Travail perdu (mmHg%)</b>				
Tous	97 [65 - 145]	84 [58 – 116]	100 [55-134]	82 [67-107]
Femme	114 [69 -154]	93 [62 – 112]	71 [50-96]	92 [59-132]
Homme	93 [64 – 115]	72 [52 – 120]	111 [63-149]	81 [69-94]
<b>Efficienc e du travail myocardique (%)</b>				
Tous	95 [93 – 97]	96 [94 – 97]	96 [94 – 97]	96 [95 – 97]
Femme	95 [93 – 96]	95 [94 – 96]	97 [96 – 98]	96 [94 – 97]
Homme	95 [95 – 97]	96 [94 -97]	94 [93 – 97]	96 [95 – 96]
<b>Données présentées en moyenne ± ET et en médiane [25th-75th percentiles].</b>				

# Le serment d'Hippocrate

Texte revu par l'Ordre des médecins en 2012

“ Au moment d'être admis(e) à exercer la médecine, je promets et je jure d'être fidèle aux lois de l'honneur et de la probité.

Mon premier souci sera de rétablir, de préserver ou de promouvoir la santé dans tous ses éléments, physiques et mentaux, individuels et sociaux.

Je respecterai toutes les personnes, leur autonomie et leur volonté, sans aucune discrimination selon leur état ou leurs convictions. J'interviendrai pour les protéger si elles sont affaiblies, vulnérables ou menacées dans leur intégrité ou leur dignité. Même sous la contrainte, je ne ferai pas usage de mes connaissances contre les lois de l'humanité.

J'informerai les patients des décisions envisagées, de leurs raisons et de leurs conséquences.

Je ne tromperai jamais leur confiance et n'exploiterai pas le pouvoir hérité des circonstances pour forcer les consciences.

Je donnerai mes soins à l'indigent et à quiconque me les demandera. Je ne me laisserai pas influencer par la soif du gain ou la recherche de la gloire.

Admis(e) dans l'intimité des personnes, je tairai les secrets qui me seront confiés. Reçu(e) à l'intérieur des maisons, je respecterai les secrets des foyers et ma conduite ne servira pas à corrompre les mœurs.

Je ferai tout pour soulager les souffrances. Je ne prolongerai pas abusivement les agonies. Je ne provoquerai jamais la mort délibérément.

Je préserverai l'indépendance nécessaire à l'accomplissement de ma mission. Je n'entreprendrai rien qui dépasse mes compétences. Je les entretiendrai et les perfectionnerai pour assurer au mieux les services qui me seront demandés.

J'apporterai mon aide à mes confrères ainsi qu'à leurs familles dans l'adversité. Que les hommes et mes confrères m'accordent leur estime si je suis fidèle à mes promesses ; que je sois déshonoré(e) et méprisé(e) si j'y manque. ”