

Mémoire de Maîtrise en médecine No 4139

Ergométrie en cardiologie pédiatrique : analyse de
la pratique courante et standardisation de la
procédure

Etudiant

Macario Sonia

Tuteur

Dr Mivelaz Yvan, médecin associé MD, MER
Département femme-mère-enfant

Expert

Dr Hafen Gaudenz, MD, PD
Département femme-mère-enfant

Lausanne, le 14.01.2018

Remerciements

Je tiens, tout d'abord, à remercier le Dr. **Yvan Mivelaz**, médecin associé au département femme-mère-enfant du CHUV, pour l'aide et le temps qu'il m'a consacré, ainsi que pour ses précieux conseils. Je remercie également la Dre. **Tatiana Boulos Ksontini**, médecin-hospitalier au département femme-mère-enfant du CHUV, pour sa disponibilité et ses explications, ainsi que le Dr **Hafen Gaudenz**, médecin agréé bénévole au département femme-mère-enfant du CHUV, pour son avis d'expert.

Finalement, je tiens à remercier **ma famille et mes amis**, pour leur soutien tout au long de ce travail et pour leur relecture attentive.

Table des matières

<u>ABREVIATIONS</u>	4
<u>RESUME</u>	5
1. INTRODUCTION	6
2. METHODOLOGIE	9
2.1 <u>POPULATION ETUDIEE</u>	9
2.2 <u>CRITERES D'INCLUSION</u>	9
2.3 <u>CRITERES D'EXCLUSION</u>	9
2.4 <u>LES TESTS ERGOMETRIQUES</u>	10
2.5 <u>OBJECTIFS</u>	10
2.6 <u>VARIABLES DE L'ETUDE</u>	10
2.7 <u>LA RECOLTE DES DONNEES</u>	11
2.8 <u>ANALYSE STATISTIQUE</u>	11
3. RESULTATS	12
3.1 <u>TESTS ERGOMETRIQUES REALISES AU CHUV</u>	12
3.1.1 <i>Etat des lieux des dispositifs et protocoles utilisés</i>	12
3.1.2 <i>Tests ergométriques aboutissant à l'effort maximal</i>	13
3.1.3 <i>Adaptation cardio-respiratoire en fonction du protocole : Bruce vs Godfrey</i>	16
3.2 <u>PERFORMANCE HEMODYNAMIQUE ET RESPIRATOIRE DES PATIENTS INCLUS DANS L'ETUDE</u>	17
3.2.1 <i>Population pédiatrique AVECINTERV et SANSINTERV : données anthropométriques et fonctionnelles</i>	17
3.2.2 <i>Présentation des variables hémodynamiques et respiratoires des patients SANSINTERV et AVECINTERV</i>	18
4. DISCUSSION	20
4.1 <u>ETAT DES LIEUX DES DISPOSITIFS ET PROTOCOLES UTILISES</u>	20
4.2 <u>TESTS ERGOMETRIQUES ABOUTISSANT A L'EFFORT MAXIMAL</u>	20
4.2 <u>ADAPTATION CARDIO-RESPIRATOIRE EN FONCTION DE L'ERGOMETRE : BRUCE VS GODFREY</u>	21
4.3 <u>ADAPTATION HEMODYNAMIQUE ET RESPIRATOIRE DES PATIENTS SANSINTERV ET AVECINTERV</u>	22
4.4 <u>ALGORITHME DE STANDARDISATION DU CHOIX DU DISPOSITIF ET DU PROTOCOLE</u>	22
4.5 <u>LIMITATIONS DE L'ETUDE</u>	25
5. CONCLUSION	26
<u>REFERENCES</u>	27
<u>ANNEXES</u>	29

Abréviations

AVECINTERV : enfants ayant eu une ou plusieurs interventions cardio-vasculaires

CPET : test d'effort cardio-pulmonaire

CV : capacité vitale

FC : fréquence cardiaque

FR : fréquence respiratoire

IMC : indice de masse corporelle

METS : équivalent métabolique

PAD : pression artérielle diastolique

PAS : pression artérielle systolique

RER : ratio d'échange respiratoire

RV : réserve ventilatoire

SANSINTERV : enfants n'ayant eu aucune intervention cardio-vasculaire

VE : ventilation minute

VE/VCO₂ : équivalent ventilatoire en CO₂ ou efficacité ventilatoire

VE/VO₂ : équivalent ventilatoire en O₂

VEMS : volume expiré maximal 1ère seconde

VO₂ : volume d'oxygène consommé

Vt : volume courant

W : watts

Résumé

Introduction : L'ergospirométrie vise à évaluer la capacité physique des patients et observer l'adaptation cardio-vasculaire, respiratoire et musculo-squelettique à l'effort. Il s'agit d'un examen important dans l'évaluation d'une pathologie cardiaque ou pulmonaire, ainsi que dans leur suivi, mais aussi pour écarter une cause cardiorespiratoire à des symptômes type précordialgie, malaise ou essoufflement à l'effort. Plusieurs dispositifs et protocoles peuvent être utilisés, mais il n'existe pour l'instant pas de consensus et de protocoles standardisés.

Le but de cette étude est : 1) de déterminer les dispositifs et les protocoles utilisés au CHUV, ainsi que le pourcentage de test ayant atteint l'effort maximal 2) de comparer les performances cardiovasculaires et respiratoires des patients avec et sans intervention cardiovasculaire.

Méthodologie : Les patients de moins de 18 ans ayant bénéficié d'une ergométrie dans l'unité de cardiologie pédiatrique du Centre hospitalier universitaire vaudois (CHUV) entre le 01.01.2013 et le 31.12.2015 ont été inclus. Pour la réalisation de cette étude, nous classons les enfants en deux catégories : les enfants ayant eu une ou plusieurs interventions cardio-vasculaire (AVECINTERV) et les enfants n'ayant eu aucune intervention (SANSINTERV).

La plupart des résultats n'ont pas une distribution normale, nous exprimons donc les résultats par la médiane et les intervalles interquartiles (Q25 et Q75). Les variables continues sont comparées grâce au test de Wilcoxon, les données catégorielles par le test du Chi-2. Les valeurs de $p < 0.05$ sont considérées comme étant significatives.

Résultats : Parmi les données des 632 tests ergométriques (486 couplés à une spirométrie), nous avons constatés que 74% étaient réalisés sur tapis roulant avec le protocole Bruce contre 26% sur un cycloergomètre avec protocole incrémentiel continu (Godfrey). Un effort maximal a été atteint (85% de la fréquence cardiaque maximale théorique) dans 83 %, 85% et 77% des tests ergométriques globaux, avec le protocole de Bruce et avec le protocole de Godfrey respectivement.

Les paramètres mesurés à l'effort sur tapis roulant qui diffèrent significativement entre les groupes AVECINTERV et SANSINTERV sont : fréquence cardiaque maximal (183.5 vs 197), équivalent métabolique maximal (13.85 vs 15.4), la durée de l'exercice (12.25 vs 13.06) et VO_2 max (42.7 vs 48.95) ; sur un cycloergomètre, ce sont : fréquence cardiaque maximal (178 vs 187), équivalent métabolique maximal (8.55 vs 10.7) et VO_2 max (36.6 vs 40.6).

Conclusion : Nous avons pu déterminer que le protocole le plus utilisé actuellement au CHUV est le protocole de Bruce et qu'il permet d'atteindre l'effort maximal dans un plus grand pourcentage de patients que le protocole de Godfrey sur cycloergomètre. Nous avons également pu établir que le groupe SANSINTERV obtient de meilleurs résultats que le groupe AVECINTERV. Sur la base de nos résultats et de la littérature, nous avons pu élaborer un arbre décisionnel pour permettre de sélectionner le meilleur ergomètre et protocole en fonction de l'indication du test, de la cardiopathie et de l'âge du patient.

1. Introduction

L'ergospirométrie ou test d'effort cardio-pulmonaire (CPET) est un test qui vise à évaluer la capacité physique des patients et à observer l'adaptation cardiovasculaire, respiratoire et musculo-squelettique à l'effort. Il s'agit d'un examen important dans l'évaluation d'une pathologie cardiaque et pulmonaire (y compris présence d'ischémies et d'arythmies), ainsi que dans leur suivi, mais aussi pour écarter une cause cardio-respiratoire à des symptômes de type précordialgie, palpitation, malaise ou essoufflement à l'effort. C'est un examen qui est également important dans l'évaluation de l'efficacité de traitements médicaux ou chirurgicaux, mais aussi dans l'évaluation de la capacité fonctionnelle pour des activités récréatives, sportives et professionnelles et afin d'établir des données de base avant une réadaptation cardiaque, pulmonaire ou musculo-squelettique. (1) Il permet de mesurer l'échange de gaz, la capacité de travail physique, la saturation transcutanée en oxygène et la pression sanguine. Un monitoring électrocardiographique et la fonction pulmonaire sont également réalisés pendant l'examen.

Chez la plupart des enfants, le CPET peut être réalisé en toute sécurité, le taux de complications (douleur thoracique, syncope, chute de la pression artérielle et arythmies) a été estimé à 1,79%. (2) Il existe, tout de même, plusieurs contre-indications absolues à la réalisation de ce test : une maladie inflammatoire active du cœur, une hépatite active, un infarctus du myocarde aigu, une pneumonie active, une hypertension systémique sévère pour l'âge, une blessure aigue musculaire. (3) Il existe trois indications générales pour mettre fin à un test d'effort : lorsque les résultats pour le diagnostic ont été établis et que de nouveaux tests ne donneraient aucune information supplémentaire ; lorsque le matériel ne fonctionne pas correctement ; lorsque des signes ou des symptômes indiquent que continuer le test pourraient compromettre le bien-être du patient. (1)

De nombreux protocoles sur cycloergomètre ou tapis roulant existent pour évaluer la fonction cardio-respiratoire des patients, il n'existe pas un protocole standard unique pour les enfants. Le protocole choisi dépend du motif du test, des caractéristiques du patient et de la capacité fonctionnelle anamnestique (Tableau 1). Il reste cependant arbitraire et laissé au libre choix du médecin impliqué. Le but est d'atteindre un effort maximal avec une durée maximale d'effort entre 6 à 10 minutes chez les enfants et 8 à 12 minutes chez les adolescents. (4)(5)

Les protocoles les plus souvent utilisés se classifient en 3 catégories : exercice incrémental à plusieurs paliers ; exercice incrémental progressif ou à rampe ; exercice à travail constant. (1) Au CHUV, les protocoles les plus utilisés sont le protocole de Bruce sur le tapis roulant, faisant partie des protocoles à exercice incrémental à plusieurs paliers et le protocole de Godfrey pour le cycloergomètre, faisant partie des protocoles à exercice incrémental progressif ou à rampe. Le protocole de Bruce implique une augmentation de la vitesse et de la pente toutes les trois minutes, de sorte que les augmentations incrémentielles pour chaque étape sont relativement

importantes (2-3 METS).(6) Le protocole de Godfrey implique une augmentation de la charge de 10, 15 ou 20 W toutes les minutes.

L'aptitude physique est considérée comme un indicateur de santé utile chez les enfants et adolescents.(7) La croissance, la puberté, le sexe et la condition physique ont tous un impact sur la réponse physiologique à l'exercice.(8)

Parmi les variables mesurable avec le CPET, la consommation maximale d'oxygène ($VO_2\text{max}$) est le meilleur indice de capacité aérobie et le gold standard pour évaluer l'aptitude cardio-respiratoire.(9) Cela représente la consommation maximale d'oxygène qu'atteint un patient au moment de l'exercice. La $VO_2\text{max}$ peut être représenté par l'équation de Fick : $VO_2\text{max} = FC\text{max} \times VES \times (CaO_2 - CvO_2)$ ¹. D'autres paramètres importants sont mesurés lors d'un test d'effort, notamment la fréquence cardiaque, qui augmente avec l'intensité de l'effort, sa valeur maximale prédite dépend de l'âge et du sexe. (10) Le ratio d'échange respiratoire (RER) est le rapport entre le CO_2 expiré et l' O_2 consommé. En général, il est autour de 0.8 au repos et 1.2 au pic de l'effort. (11) Un, des autres paramètres, mesuré est l'équivalent ventilatoire en O_2 , qui est le nombre de litres d'air ventilé par litre d'oxygène consommé, il s'agit d'un indice d'efficacité ventilatoire. Il augmente avec l'intensité de l'effort et peut être élevé en cas de maladie pulmonaire ou insuffisance cardiaque congestive. (10)

Comme dit précédemment, le CPET reste un examen important dans l'évaluation des patients atteints d'une cardiopathie congénitale ou acquise. Ce sont des enfants qui ont souvent des limites dans leur capacité physique. Par exemple, les enfants opérés d'une tétralogie de Fallot ont un débit cardiaque réduit, une consommation maximale d'oxygène sous-normale, une capacité de diffusion pulmonaire diminué et une durée du temps d'exercice maximal également diminué. (12) Le CPET est donc utilisé afin de 1) quantifier la capacité fonctionnelle (p. ex. pour évaluer une diminution anamnestique), 2) mettre en évidence des pathologies cardio-circulatoires silencieuses au repos (hypertension, arythmie, ischémie) pour lesquelles ils sont plus à risque. Le CPET est aussi fréquemment effectué pour écarter une pathologie cardio-respiratoire chez des enfants présentant des symptômes à l'effort de type : douleurs thoraciques, essoufflement, fatigue, palpitations ou malaises. Le choix du test et du protocole va donc dépendre du type de cardiopathie et de son indication (tableau 1).

¹ Volume d'oxygène maximal = fréquence cardiaque maximal x volume d'éjection systolique maximal x différence artérioveineuse en oxygène.

Tableau 1 : Choix du CPET en fonction des informations souhaitées. (6) (11)

Condition ou question	Ergomètre préférentiel	Justification
Sténose/insuffisance de l'aorte (non corrigée/corrigée)	Vélo	Détection d'ischémie sur l'ECG plus facile car moins d'artéfact
Transposition des gros vaisseaux corrigée	Vélo	Détection d'ischémie sur l'ECG plus facile
Tétralogie de Fallot corrigée	Vélo	Evaluation des arythmies pendant l'exercice
Anomalies des artères coronaires, (corrigées/non corrigées)	Vélo	Détection d'ischémie à l'ECG plus facile
Ventricule unique (fonctionnel)	Vélo	Détection d'ischémie et arythmies sur l'ECG plus facile
Coarctation de l'aorte (non corrigée/corrigée)	Vélo	Evaluation de la pression artérielle plus précise
Exercice induisant asthme, bronchospasme, douleur thoracique	Tapis roulant	Course plus susceptible d'induire des symptômes que le vélo
Capacité aérobie	Tapis roulant	VO2max plus élevé avec le tapis roulant que le vélo
Evaluation d'arythmies/ Syndrome du QT long	Vélo	Détection d'arythmies et mesure de l'intervalle QT sur l'ECG plus facile car moins d'artéfact
Evaluation de la réponse rythmique du pacemaker	Tapis roulant	Meilleure activation des senseurs basé sur l'accélération

2. Méthodologie

Il s'agit d'une étude observationnelle qui analyse de manière rétrospective les données ergospirométriques de patients suivis dans le service de cardiologie pédiatrique du Centre hospitalier universitaire vaudois (CHUV), qui ont été collectés de façon prospective avec l'accord de la commission cantonale (VD) d'éthique de la recherche sur l'être humain.

2.1 Population étudiée

L'échantillon de population étudié dans cette étude comprend les enfants ayant réalisé un test ergométrique entre 2013 et 2015 dans l'unité de cardiologie pédiatrique du CHUV. Il s'agit d'enfants qui ont effectué un test d'effort dans le cadre du suivi d'une maladie connue ou pour exclure une cardiopathie. Les tests ergométriques peuvent se dérouler avec ou sans spirométrie selon l'âge et la situation clinique du patient. Dans la suite du manuscrit, le terme «ergométrie» désignera tous les tests d'effort effectués, alors que le terme «ergospirométrie» sera réservé aux seuls tests ayant été couplés à une spirométrie.

Pour la réalisation de cette étude, nous avons classé ces enfants en deux catégories : les enfants ayant eu une intervention cardiaque chirurgicale ou par cathétérisme (AVECINTERV) et les enfants n'ayant pas eu d'intervention (SANSINTERV). Les cardiopathies des enfants AVECINTERV consistaient en : tétralogie de Fallot, coarctation de l'aorte, communication interventriculaire, communication interauriculaire, ventricule unique, hypoplasie du ventricule droit, malformation congénitale valvulaire, transposition des gros vaisseaux, tronc artériel commun. Le diagnostic de canal artériel perméable n'a pas été retenu parmi les anomalies, car il est le plus souvent physiologique et nous n'avons pas pu déterminer les cas où le canal artériel était le motif principal de l'intervention.

2.2 Critères d'inclusion

Les patients inclus dans l'étude sont tous les enfants de moins de 18 ans ayant effectué un test ergométrique sur un tapis roulant ou un cycloergomètre entre le 01.01.2013 et le 31.12.2015 dans l'unité de Cardiologie pédiatrique du CHUV.

2.3 Critères d'exclusion

Les tests non interprétables et les protocoles non standardisés ont été exclus de l'étude. Pour les tests avec tapis roulant, uniquement ceux ayant suivi un protocole de Bruce ont été retenus. Pour le cycloergomètre, uniquement les protocoles avec augmentation incrémentiel progressive de la charge ont été retenus.

2.4 Les tests ergométriques

La réalisation des tests ergométriques s'est faite entre le 01.01.2013 et le 31.12.2015 par différents professionnels travaillant dans l'unité de Cardiologie pédiatrique, tous formés à l'utilisation de l'ergospirométrie. Les dispositifs utilisés sont, pour l'analyse électrocardiographique et les données hémodynamiques (saturation, tension artérielle), la solution CardioPerfect de Welh Allyn® et pour l'analyse spirométrique la solution Blue Cherry de Geratherm®.

2.5 Objectifs

Le but de cette étude est dans un premier temps d'établir parmi les tests ergométriques effectués dans l'Unité de cardiologie pédiatrique du CHUV, les éléments suivants :

- 1) Dispositifs (tapis roulant ou cylcoergomètre) et protocoles utilisés
- 2) Tests considérés comme ayant atteint un effort maximal lorsque la fréquence cardiaque maximale est de 85% ou plus de la valeur prédite maximale ($220 - \text{âge du patient}$).

Sur la base de ces éléments, nous essayons de proposer une standardisation du choix du dispositif et du protocole en fonction du genre, de la classe d'âge et de la présence d'une cardiopathie.

Dans un deuxième temps, les performances hémodynamiques et respiratoires sont comparées entre 1) les patients AVECINTERV et 2) les patients SANSINTERV

2.6 Variables de l'étude

- Données anthropométriques (sexe, âge, taille, poids)
- Variables ergospirométriques au repos, au temps $VO_2\text{max}$ et la valeur maximale obtenue en fonction des variables :
 - o Fréquence cardiaque (FC)
 - o Fréquence respiratoire (FR)
 - o Pression artérielle systolique et diastolique (PAS et PAD)
 - o Volume courant (V_t)
 - o Volume expiré maximal 1ère seconde (VEMS)
 - o Capacité vitale (CV)
 - o La ventilation minute (VE)
 - o La consommation d'oxygène (VO_2)
 - o Equivalent ventilatoire en O_2 (VE/VO_2)
 - o Equivalent ventilatoire en CO_2 ou efficacité ventilatoire (VE/VCO_2)
 - o Pouls d'oxygène maximal (VO_2/FC)

- Ratio d'échange respiratoire (RER)
- Réserve ventilatoire (RV)
- Charge maximale
- Equivalent métabolique (METS)
- Intervention (s'il y a eu ou pas une intervention au CHUV)

2.7 La récolte des données

Les données ergométriques ont été récoltées manuellement à partir du système Welchallyn et les données spirométriques ont été récoltés par des informaticiens à partir du logiciel de spirométrie BlueCherry. Les données ont ensuite été croisées avec les bases de données de chirurgie cardiaque et de cathétérisme (interventions), afin de différencier les patients ayant eu au moins une intervention, des patients n'en n'ayant pas eu.

2.8 Analyse statistique

Pour la réalisation des statistiques, nous avons utilisé le programme STATA. L'évaluation de la normalité de la distribution des variables observées a été réalisée visuellement (box-plots) et en utilisant le test de Shapiro-Wilk. La grande majorité des paramètres étudiés n'ayant pas une distribution normale, nous avons exprimé la totalité des résultats par la médiane et les intervalles interquartiles 25 et 75 (IQ25 et IQ75). Les variables continues ont été comparés grâce au test de Wilcoxon, les données catégorielles par le test du Chi-2. Les valeurs de $p < 0.05$ ont été considérées comme étant significatives.

3. Résultats

3.1 Tests ergométriques réalisés au CHUV

3.1.1 Etat des lieux des dispositifs et protocoles utilisés

Au total, 632 tests d'effort ont été réalisés dans l'unité de Cardiologie pédiatrique du CHUV, dont 146 ergométries et 486 ergospirométries. Les caractéristiques de la population en fonction du protocole utilisé (Bruce vs Godfrey) sont présentées au *Tableau 2*. Au moment de l'examen, les enfants étaient âgés de 5.4 ans (pour le plus jeune) jusqu'à de 17.9 ans (pour le plus âgé). Le test d'effort avec protocole de Bruce représente 74,5% des tests réalisés en cardiologie pédiatrique. Pour les deux protocoles, ¼ des patients sont les patients AVECINTERV. Les patients testés sur tapis roulant sont significativement plus jeunes, plus petits et plus légers. (*Tableau 2*).

Il n'existe pas de différence significative ($p = 0.632$) dans le choix de l'ergomètre en fonction de si le patient fait partie du groupe AVECINTERV ou non, approximativement un quart des tests se déroulent sur cycloergomètre dans les deux cas.

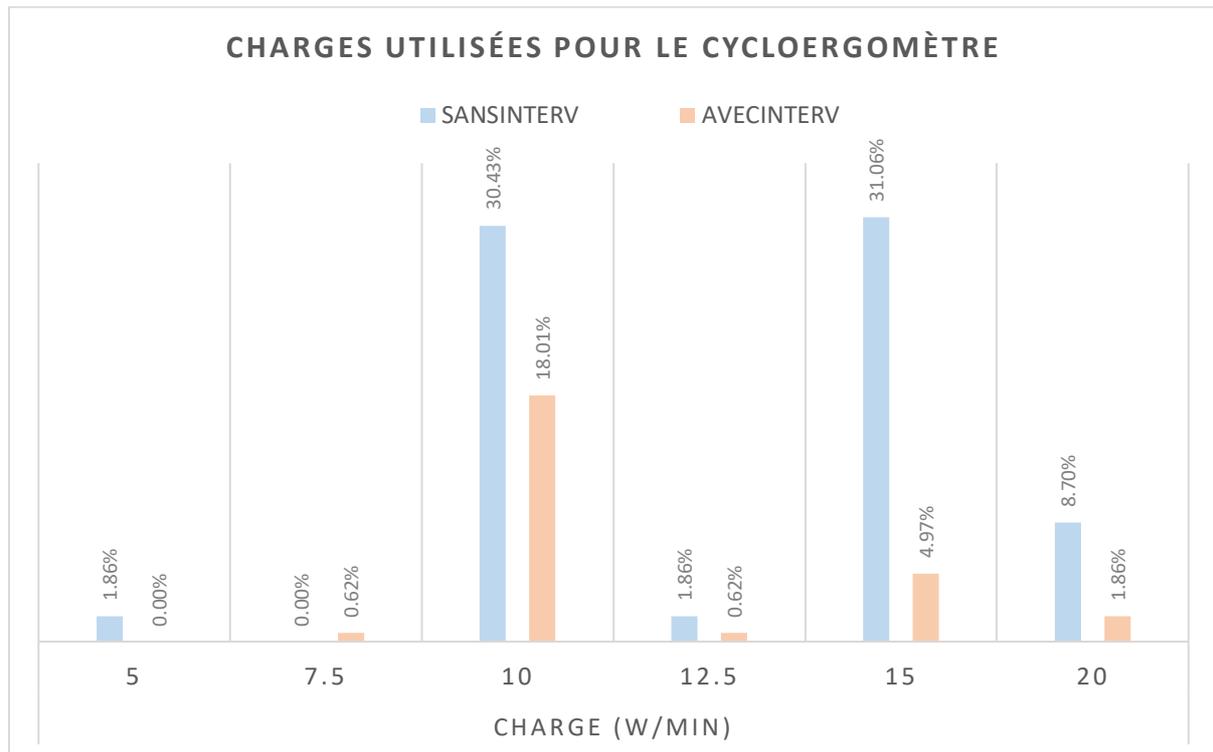
Tableau 2: caractéristiques de la population en fonction du protocole utilisé

Paramètres	Bruce (n=471)	Godfrey (n=161)	Valeur-p
Filles : % (n=246)	40.3	34.8	0.212
AVECINTERV : % (n=156)	24.2	26.1	0.632
Age : années (n=632)	12.18 (9.51 - 14.28)	14.98 (13.63 - 15.91)	$p < 0.001$
Taille : cm (n=622)	150 (135 - 162)	165 (158 - 172)	$p < 0.001$
Poids : Kg (n=620)	40.2 (29.6 - 52)	54.95 (46.95 - 62)	$p < 0.001$
IMC : kg.m ⁻² (n=620)	17.82 (15.9 - 20.1)	19.87 (18.03 - 21.53)	$p < 0.001$

Légende : IMC : indice de masse corporelle.

Parmi les enfants SANSINTERV, les charges les plus utilisées pour le cycloergomètre sont 10 watt et 15 watt/min. Parmi les enfants AVECINTERV, la charge la plus utilisée est 10 watt/min. (Figure 1)

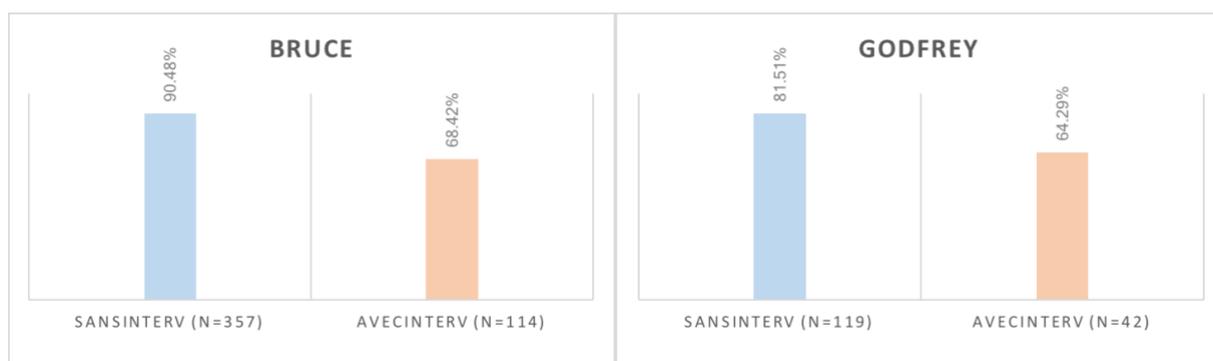
Figure 1: Cycloergomètre : charges utilisées dans le protocole incrémentiel (Godfrey).



3.1.2 Tests ergométriques aboutissant à l'effort maximal

Parmi les tests ergométriques totaux, 83.1 % ont abouti à l'effort maximal. Parmi les tests ergométriques réalisés avec le protocole Bruce sur tapis roulant, 85.17% ont abouti à l'effort maximal contre 77.16% avec le protocole de Godfrey sur cycloergomètre (significatif avec $p < 0.05$). Le fait que l'ergométrie soit couplée à une spirométrie ou non n'influence pas le pourcentage d'atteinte de l'effort maximal quelques soit le dispositif utilisé. Le groupe AVECINTERV parvient à un effort maximal dans un pourcentage de cas significativement réduit quelques soit le type d'ergomètre (figure 2).

Figure 2: Tests maximaux pour les protocoles de Bruce et de Godfrey, dans la population AVECINTERV et SANSINTERV.



Le pourcentage de tests maximaux pour le protocole de Godfrey sur cycloergomètre en fonction de la charge utilisée est présenté dans le Tableau 3. Parmi les 2 charges les plus utilisées (10 et 15 W/min), 15 W/min permet d'atteindre un pourcentage de tests maximaux plus élevé.

Tableau 3 : Tests maximaux pour le protocole de Godfrey sur cycloergomètre en fonction de la charge utilisée (p= 0.620).

Charge	Test maximaux (%)
5 Watt/min (n=3)	66.7
7.5 Watt/min (n=1)	100.0
10 Watt/min (n=78)	71.8
12.5 Watt/min (n=4)	75.0
15 Watt/min (n=58)	84.8
20 Watt/min (n= 17)	76.5

Le Tableau 4 présente les différences de valeurs entre les patients ayant atteint l'effort maximal et ceux qui ne l'ont pas atteint. Le groupe SANSINTERV arrive à un pourcentage de CPET ayant atteint l'effort maximal significativement plus élevé que le test soit réalisé avec le protocole de Bruce ou le protocole de Godfrey. Parmi le groupe ayant réalisé le CPET avec le protocole de Bruce, les enfants n'atteignant pas l'effort maximal sont significativement plus jeunes, plus petits et plus légers. Sur le *Tableau 5*, présentation du nombre de CPET ayant abouti à l'effort maximal en fonction de la taille de l'enfant et de l'incrément de charge par minute. Sur le *Tableau 6* et le *Tableau 7*, présentation du nombre de CPET réalisées en fonction du protocole, de l'âge et de l'appartenance au groupe SANSINTERV ou AVECINTERV.

Tableau 4: Caractéristiques des patients ayant atteint ou pas l'effort maximal.

Protocole	Paramètres	Tests maximaux	Tests sous-maximaux	Valeur-P
Bruce et Godfrey (n=632)	Filles / Garçons: %	82.52 / 83.51	17.48 / 16.49	0.747
	SANSINTERV / AVECINTERV: %	88.24 / 67.31	11.76 / 32.69	p < 0.001
	Age: années (n=632)	13.23 (10.35 - 15.03)	12.46 (8.94 - 15.52)	0.3178
	Poids: Kg (n=620)	46 (34 - 56.85)	40.6 (27.25 - 56.35)	0.0518
	Taille: cm (n=622)	156 (140 - 166)	152 (135 - 167)	0.1315
Bruce (n=471)	Filles / Garçons: %	84.21 / 85.77	15.79 / 14.23	0.642
	SANSINTERV / AVECINTERV: %	90.48 / 68.42	9.52 / 31.58	p < 0.001
	Age: années (n=471)	12.49 (9.82 - 14.5)	10.75 (8.27 - 12.88)	p < 0.001
	Poids: Kg (n=464)	42 (31 - 53.2)	31 (25 - 43)	p < 0.001
	Taille: cm (n=465)	153 (137 - 163)	140 (129 - 156)	p < 0.001

	Filles / Garçons: %	76.79 / 77.14	23.21 / 22.86	0.959
	SANSINTERV / AVECINTERV: %	81.51 / 64.29	18.49 / 35.71	p < 0.05
Godfrey (n=161)	Age: années (n=161)	14.7 (13.56 - 15.7)	15.53 (13.69 - 16.65)	p < 0.05
	Poids: Kg (n=156)	54.6 (46.5 - 61.4)	58 (51 - 62.5)	0.2358
	Taille: cm (n=157)	165 (156 - 173)	168 (159 - 171.5)	0.4321

Tableau 5: Nombre de CPET (% entre parenthèse) avec le protocole de Godfrey ayant abouti à l'effort maximal en fonction de la taille de l'enfant et de la charge utilisée.

Charge	Taille						
	120-129.9	130 - 139.9	140-149.9	150-159.9	160-169.9	170-179.9	180-189.9
10W	1 (100%)	1 (50%)	4 (66.7%)	19 (82.6%)	21 (72.4%)	8 (57.1%)	1 (50%)
15W	0	2 (100%)	2 (100%)	7 (77.8%)	16 (80%)	15 (93.8%)	5 (83.3%)
20W	0	0	0	0	2 (100%)	7 (70%)	4 (80%)
Total	1	3	6	26	39	30	10

Tableau 6: Nombre de CPET ayant atteint l'effort maximal chez les patients AVECINTERV en fonction de l'âge.

	Âge (ans)	5-	6-	7-	8-	9-	10-	11-	12-	13-	14-	15-	16-	17-
		5,9	6,9	7,9	8,9	9,9	10,9	11,9	12,9	13,9	14,9	15,9	16,9	18
Bruce	Test max	1	4	5	8	11	11	4	5	7	10	4	4	4
	%	50	60	55.6	61.5	78.6	84.6	50	45.5	77.8	100	66.7	57.1	80
Godfrey	Test max	0	0	0	0	1	2	0	2	4	6	7	4	1
	%	-	-	-	-	50	100	0	100	80	75	100	57.1	12.5

Légende : Tests max : nombre de CPET ayant abouti à l'effort maximal ; % : pourcentage des CPET ayant abouti à l'effort maximal.

Tableau 7: Nombre de CPET ayant atteint l'effort maximal chez les patients SANSINTERV en fonction de l'âge.

	Âge (ans)	5-	6-	7-	8-	9-	10-	11-	12-	13-	14-	15-	16-	17-
		5,9	6,9	7,9	8,9	9,9	10,9	11,9	12,9	13,9	14,9	15,9	16,9	18
Bruce	Test max	4	10	18	24	25	40	17	40	43	38	28	26	11
	%	66.7	80	90	75	100	88.9	81	95.2	93.5	90.5	96.6	100	91.7
Godfrey	Test max	0	0	0	1	0	3	6	9	15	18	25	12	8
	%	-	-	-	50	-	75	100	81.8	83.3	85.7	75.8	75	100

Légende : Tests max : nombre de CPET ayant abouti à l'effort maximal ; % : pourcentage des CPET ayant abouti à l'effort maximal

3.1.3 Adaptation cardio-respiratoire en fonction du protocole : Bruce vs Godfrey

Le CPET sur tapis roulant produit une activité physique et une dépense énergétique de plus grande intensité, se traduisant par une FC à VO₂max, FC max, FR à VO₂max, VO₂max/kg et METS max plus élevés (Tableau 8).

Tableau 8: Caractéristiques ergospirométriques en fonction de l'ergomètre.

Paramètres	Tapis roulant	Cycloergomètre	P Value
FC à VO ₂ max: b/min (n=456)	182 (166 - 192)	176 (162.1 - 185.2)	p < 0.05
FC max: b/min (n=632)	194 (185 - 202)	185 (176 - 194)	p < 0.001
% FCmax (n=632)	93 (88 - 97)	90 (86 - 94)	p < 0.001
FR à VO ₂ max: c/min (n=469)	55.56 (48 - 64.52)	47.62 (39.55 - 53.1)	p < 0.001
PAS max : mmHg (n=624)	153 (139 - 168)	166 (147 - 185)	p < 0.001
PAD max: mmHg (n=624)	70.5 (62 - 81)	69 (61 - 78)	0.1366
Vt à VO ₂ max: L (n=469)	1.176 (0.858 - 1.506)	1.551 (1.301 - 1.977)	p < 0.001
VE à VO ₂ max: L/min (n=469)	65.3 (52.2 - 81.6)	74.47 (58.5 - 92.8)	p < 0.001
VO ₂ max: mL/min (n=469)	1901 (1488 - 2387)	2168 (1789 - 2722)	p < 0.001
VO ₂ max/kg : mL/min/kg (n=469)	46.75 (38.57 - 56.2)	39.1 (33.5 - 47.6)	p < 0.001
VE/VO ₂ à VO ₂ max (n=469)	34 (30 - 38)	33 (30 - 38)	0.2521
VE/VCO ₂ à VO ₂ max (n=469)	34 (31 - 38)	32 (28.9 - 36)	p < 0.001
Pouls d'O ₂ à VO ₂ max (n=456)	11 (8.5 - 13)	12.12 (10.5 - 16)	p < 0.001
RER à VO ₂ max (n=469)	0.99 (0.92 - 1.06)	1.05 (0.97 - 1.12)	p < 0.001
RV à VO ₂ max: % (n=396)	26 (13.6 - 38)	35.65 (26.7 - 44.7)	p < 0.001
METS max (n=626)	15.2 (13.4 - 17.2)	10.3 (8.4 - 12)	p < 0.001
Charge à VO ₂ max : W (n=398)	211 (157.5 - 278)	141 (116 - 189)	p < 0.05
Durée de l'exercice: min (n=631)	12.86 (11.08 - 14.35)	10.48 (8.18 - 11.82)	p < 0.001

Légende : FC : fréquence cardiaque ; FR: fréquence respiratoire ; PAS max : pression artérielle systolique maximale ; PAD max : pression artérielle diastolique maximale ; Vt : volume courant ; VEMS : volume expiratoire maximal par seconde ; CV : capacité vitale ; VE : ventilation minute ; VO₂max : volume d'oxygène maximal ; VE/VO₂ : équivalent ventilatoire en O₂ ; VE/VCO₂ : Equivalent ventilatoire en CO₂ ; RER : ratio d'échange respiratoire ; RV : réserve ventilatoire ; METS max : équivalent métabolique maximal.

3.2 Performance hémodynamique et respiratoire des patients inclus dans l'étude

3.2.1 Population pédiatrique AVECINTERV et SANSINTERV : données anthropométriques et fonctionnelles

Sur le *Tableau 9*, présentation des données anthropométriques et fonctionnelles de la population de l'étude. Les patients du groupe AVECINTERV ont tendance à être plus jeunes et sont significativement plus petits et plus légers. Le *Tableau 10* montre la distribution des anomalies cardiaques parmi les 156 tests des patients AVECINTERV. 115 patients avaient plus d'une anomalie cardiaque.

Tableau 9 : Données anthropométriques et fonctionnelles de la population pédiatrique de l'étude.

Paramètres	SANSINTERV	AVECINTERV	Valeur-p
Femme: % (n=246)	40.76%	33.33%	0.099
Age : années (n=632)	13.26 (10.51 - 15.05)	12.53 (9.57 - 15.14)	0.1767
Taille: cm (n=622)	157 (141 - 166)	151 (134 - 167)	p < 0.05
Poids: Kg (n=620)	47 (35 - 56.7)	41 (28 - 56)	p < 0.05
IMC: Kg.m-2 (n=620)	18.48 (16.76 - 20.94)	17.70 (15.32 - 20.22)	p < 0.05
FC repos: b/min (n= 463)	91 (80 - 101)	89 (80 - 98)	0.2185
FR repos: c/min (n=469)	18.13 (14.44 - 22.96)	20.34 (16.09 - 25.59)	p < 0.05
PAS repos: mmHg (n=601)	115 (105 - 127)	117 (107 - 129)	0.1544
PAD repos: mmHg (n=601)	69 (60 - 76)	68 (60 - 74)	0.166

Légende : IMC : indice de masse corporelle ; FC : fréquence cardiaque ; FR : fréquence respiratoire ; PAS : pression artérielle systolique ; PAD : pression artérielle diastolique

Tableau 10 : Distribution des anomalies cardiaques parmi les patients AVECINTERV qui ont effectué les CPET.

Anomalies	Filles	Garçons	Total
Communication interventriculaire	42	68	110
Coarctation de l'aorte	6	24	30
Ventricule unique	8	17	25
Transposition des gros vaisseaux	4	20	24
Tétralogie de Fallot	7	13	20
Sténose aortique	3	13	16
Sténose pulmonaire	3	12	15
Communication interauriculaire	4	9	13
Canal atrioventriculaire	0	5	5
Anomalie d'Ebstein	5	0	5
Interruption de l'arc aortique	2	1	3
Atrésie pulmonaire à septum intact	2	0	2
Atrésie pulmonaire à septum ouvert	1	0	1

3.2.2 Présentation des variables hémodynamiques et respiratoires des patients SANSINTERV et AVECINTERV

Parmi les variables hémodynamiques et respiratoires prises au repos, seul quelques paramètres respiratoires sont significativement différents : FR, CV, VE/VO₂, VE/VCO₂, RV et VEMS (*Tableau 11*).

Tableau 11: variables hémodynamiques et respiratoires prises au repos des patients SANSINTERV et AVECINTERV.

Paramètres	SANSINTERV	AVECINTERV	Valeur-p
FC: b/min (n= 463)	91 (80 - 101)	89 (80 - 98)	0.2185
FR: c/min (n=469)	18.13 (14.44 - 22.96)	20.34 (16.09 - 25.59)	p < 0.05
PAS: mmHg (n=601)	115 (105 - 127)	117 (107 - 129)	0.1544
PAD: mmHg (n=601)	69 (60 - 76)	68 (60 - 74)	0.166
Vt: L (n=470)	0.458 (0.329 - 0.629)	0.459 (0.320 - 0.571)	0.3223
CV: L (n=485)	2.90 (2.28 - 3.82)	2.46 (1.92 - 3.29)	p < 0.001
VE: L/min (n=468)	8.2 (6.2 - 11.1)	8.5 (6.78 - 11.2)	0.1916
VO ₂ : mL/min (n=470)	230.5 (163 - 322.55)	228 (161 - 301)	0.616
VO ₂ /Kg: mL/min/kg (n=470)	5.09 (3.65 - 6.9)	5.54 (3.7 - 7.2)	0.2966
VE/VO ₂ (n=469)	35 (40 - 41)	40 (34 - 44)	p < 0.001
VE/VCO ₂ (n=469)	39 (35 - 45)	44 (38 - 50)	p < 0.001
Pouls d'O ₂ (n=465)	2.49 (2 - 4)	2.84 (2 - 3.53)	0.9615
RER (n=469)	0.87 (0.81 - 0.95)	0.87 (0.82 - 0.95)	0.5429
RV: % (n=468)	91.2 (87.69 - 93.6)	89.54 (85.45 - 92.57)	p < 0.05
VEMS: L/s (n= 486)	2.45 (1.95 - 3.25)	2.16 (1.66 - 2.76)	p < 0.05

Légende : FC : fréquence cardiaque ; FR : fréquence respiratoire ; PAS : pression artérielle systolique ; PAD : pression artérielle diastolique ; Vt : volume courant ; CV : capacité vitale ; VE : ventilation minute ; VO₂ : consommation d'oxygène ; VE/VO₂ : équivalent ventilatoire en O₂ ; VE/VCO₂ : équivalent ventilatoire en CO₂ ; RER : ratio d'échange respiratoire ; RV : réserve ventilatoire ; VEMS : volume expiré maximal seconde.

Le *Tableau 12* présente une sélection de variables hémodynamiques et respiratoires des groupes AVECINTERV et SANSINTERV, en fonction de l'ergomètre choisi. Pour un dispositif donné, les patients du groupe AVECINTERV ne sont pas capables de produire une activité physique et une dépense énergétique aussi importante que les groupe SANSINTERV. Ceci se reflète par des valeurs de METS max, FC max et VO₂max diminuées (*Tableau 12*). Il n'y a qu'avec le Bruce que la durée maximale de l'exercice est différente entre les 2 groupes.

Tableau 12 : variables hémodynamiques et respiratoires maximales des patients SANSINTERV et AVECINTERV en fonction du dispositif et protocole utilisés.

Paramètres	Bruce		Godfrey	
	SANSINTERV	AVECINTERV	SANSINTERV	AVECINTERV
METS max (n=626)	15.4 (13.4 - 17.2)	13.85 (12.4 - 15.8)	10.7 (9.2 - 12.6)	8.55 (7.8 - 10.5)
FC max: b/min (n=632)	197 (189 - 202)	183.5 (172 - 194)	187 (180 - 194)	178 (161 - 187)
PAS max: mmHg (n=624)	153 (138 - 168.5)	153.5 (140 - 167)	167.5 (146 - 187)	164.5 (151 - 184)
PAD max: mmHg (n=624)	71 (62 - 81)	70 (62 - 81)	69 (61 - 78)	66.5 (57 - 76.5)
Durée de l'exercice: min (n=631)	13.06 (11.28 - 14.95)	12.25 (10.42 - 13.27)	10.56 (8.33 - 12.03)	9.83 (7.68 - 11.72)
VO2max/kg: mL/min/kg (n=469)	48.95 (40.85 - 56.6)	42.7 (31.4 - 51)	40.6 (34.4 - 48) *	36.6 (28.8 - 45) *

Légende : METS max : équivalent métabolique maximal ; FC max : fréquence cardiaque maximale ; PAS max : pression artérielle systolique maximale ; PAD : pression artérielle diastolique maximale.

Les valeurs surlignées en gris clair sont significativement différentes entre AVECINTERV et SANSINTERV avec $p < 0.001$. Les valeurs surlignées en gris clair avec * sont significativement différentes entre AVECINTERV et SANSINTERV avec $p < 0.05$.

4. Discussion

4.1 Etat des lieux des dispositifs et protocoles utilisés

Entre le 01.01.2013 et 31.12.2015, 632 tests d'efforts, dont 488 couplé à une spirométrie, ont été réalisés dans le service de cardiologie pédiatrique, ce qui représente plus de 200 tests par année. La plupart des tests ergométriques (74,52%) réalisés au CHUV se font avec le protocole de Bruce sur tapis roulant. Selon une étude réalisée aux Etats-Unis, le protocole de Bruce est le protocole sur tapis roulant le plus fréquemment utilisé pour les CPET chez les enfants et les adolescents.(13) Les enfants qui ont réalisé un test avec le protocole de Bruce sont plus jeunes, plus petits, avec un IMC plus bas que ceux ayant réalisé un CPET sur cycloergomètre. Ce qui pourrait s'expliquer par le fait qu'il est plus naturel et facile de marcher que de faire du vélo et que par conséquent pour les plus jeunes enfants, le choix du protocole se porte sur le protocole de Bruce sur tapis roulant.

Par contre, plusieurs inconvénients sont associés au CPET sur le tapis roulant. Il est plus dangereux qu'un exercice effectué sur le cycloergomètre et il est difficile de quantifier avec précision le taux de travail d'un sujet pendant un test de tapis roulant. Les mesures de l'échange gazeux et de la tension artérielle, ainsi que les mesures ECG et échocardiographie, sont plus faciles à réaliser sur des patients sur le cycloergomètre que sur le tapis roulant. Ainsi, dans la plupart des tests ergospirométriques, le cycloergomètre fournirait des mesures plus fiables pendant l'exercice. Cependant, certains enfants, en particulier ceux de 6 ans et moins, peuvent avoir du mal à maintenir une cadence régulière lors du pédalage, même lorsque le cycloergomètre est ajusté à leur taille.(1)

Parmi les tests réalisés sur les patients AVECINTERV, la plupart des tests ergométriques (73,08%) ont été réalisés avec le protocole de Bruce sur un tapis roulant. Le résultat est plus ou moins similaire parmi les patients SANSINTERV (75%). On ne retrouve donc pas de différence significative entre le choix du protocole en fonction de si le patient fait partie du groupe AVECINTERV ou SANSINTERV. Pourtant, en se basant sur *Tableau 1*, pour la plupart des pathologies cardiaques corrigées ou non, il serait indiqué d'effectuer le test d'effort sur un cycloergomètre. (11)

4.2 Tests ergométriques aboutissant à l'effort maximal

Analyse globale

Parmi les ergométries réalisées avec le protocole Bruce sur tapis roulant, 85.17% aboutissent à l'effort maximal contre 77.02% avec le protocole de Godfrey sur cycloergomètre. LeMura et Al. avaient obtenu chez des enfants en bonne santé entre 5 et 6 ans un taux supérieur de test maximal sans différence significative (96% avec tapis roulant vs. 92% avec cycloergomètre).(14) Dans notre étude, les enfants qui ont effectués un test d'effort avec le protocole de Bruce

étaient significativement plus jeunes, mais l'âge ne devrait pas être un facteur influençant cet aspect. En revanche, cela est bien connu que les tests sur tapis roulant nécessitent une intensité d'exercice et une dépense énergétique plus importante.

Indépendamment du protocole, nous avons observé que significativement moins d'enfants AVECINTERV arrivent à l'effort maximal (groupe AVECINTERV 67.31% vs. 88.24% groupe SANSINTERV). Norozi et Al. ont trouvé que parmi des enfants et des adultes atteints de cardiopathies congénitales opérées, 66% atteignaient plus de 80% de la fréquence cardiaque prédite ($220 - \text{âge}$). Ils ont mis en avant que l'insuffisance chronotrope est fréquente chez les patients atteints d'une cardiopathie congénitale, même 20 ans après l'opération réparatrice.(15) Dans notre étude, on ne retrouve pas de différence entre les garçons et les filles en ce qui concerne l'atteinte de l'effort maximal.

Analyse Bruce seul

En ce qui concerne les CPET effectués avec le protocole de Bruce uniquement, on retrouve une différence significative entre le groupe qui atteint l'effort maximal et celui qui ne l'atteint pas. Les enfants qui n'atteignent pas l'effort maximal sont plus jeunes, plus petits et plus légers. Ceci est probablement en lien avec le fait qu'il peut être difficile de motiver des jeunes enfants à produire un effort maximal ou qu'ils ne sont pas familiers et à l'aise avec le dispositif utilisé.

Analyse Godfrey seul

Parmi le groupe ayant réalisé un CPET avec le protocole de Godfrey, on ne retrouve pas de différence significative en ce qui concerne la taille, le poids et l'intensité de la charge choisie entre le groupe qui a atteint l'effort maximal et celui qui ne l'a pas atteint. Dans ce groupe, le pourcentage d'enfants faisant parti du groupe AVECINTERV est de 26 % (vs 24% dans le groupe Bruce), ce qui n'expliquerait pas non plus la non atteinte de l'effort maximal plus élevé dans le groupe Godfrey. Par contre, sur le vélo, la fatigue musculaire peut survenir prématurément, ce qui pourraient empêcher les sujets d'atteindre leur capacité maximale.(6) On retrouve, tout de même, une différence significative en ce qui concerne l'âge, les patients n'atteignant pas l'effort maximal étant plus âgés. Une analyse de ce sous-groupe aurait pu apporter plus d'informations, afin de déterminer les facteurs (genre, BMI, AVECINTERV) pouvant influencer la non atteinte de l'effort maximal chez des adolescents plus âgés.

Nous avons pu déterminer que parmi les charges les plus utilisées (soit 10 et 15 W/min), 15 W/min permet d'atteindre un pourcentage de tests maximaux plus élevé.

4.2 Adaptation cardio-respiratoire en fonction de l'ergomètre : Bruce vs Godfrey

La plupart des valeurs sont significativement différentes en fonction de si elles sont obtenues avec le protocole de Bruce (groupe Bruce) sur tapis roulant ou le protocole de Godfrey (groupe Godfrey) sur cycloergomètre. La FCmax est significativement plus élevée dans le groupe Bruce comparé au groupe Godfrey (*Tableau 8*). Quelques études ont également démontré que la

FCmax était plus élevée sur un tapis roulant que sur un cycloergomètre chez des enfants de 7 à 9 ans (16) et chez des enfants de 5 à 6 ans (14). La VO₂max/kg atteint avec le protocole de Bruce sur tapis roulant est aussi plus élevée que la VO₂max/kg atteint avec le protocole de Godfrey sur cycloergomètre. Ce qui corrobore avec certaines études, qui montrent que la VO₂max est augmentée lorsqu'il est mesuré sur tapis roulant chez des enfants de 7 à 9 ans (16) et chez des enfants de 5 à 6 ans (14).

En ce qui concerne le RER, on retrouve un RER significativement plus élevé sur cycloergomètre que sur tapis roulant. Dans la littérature, il est également noté d'un RER plus élevé sur le cycloergomètre que sur le tapis roulant chez des enfants de 5 à 6 ans (14). En revanche, Turley et al. (16) avaient observé un RER plus élevé sur tapis roulant que sur cycloergomètre chez les enfants de 5 à 6 ans. Ils expliquaient cette incohérence par le niveau de motivation qui influencerait les tests maximaux des enfants. Dans leur étude, les enfants avaient été très motivés, par rapport à d'autres études. La valeur de METS max est significativement plus élevée dans le groupe Bruce, ce qui reflète que l'intensité de l'activité est effectivement plus élevée dans ce groupe comme cela est bien décrit dans la littérature.

Dans notre étude, les valeurs spirométriques Vt à VO₂max et VE à VO₂max sont significativement plus élevées sur cycloergomètre. Dans la littérature, nous n'avons pas trouvé d'études comparant ces paramètres, par contre il est noté d'un VEmax significativement plus élevé sur tapis roulant (16) ou d'un VEmax plus élevé sur tapis roulant mais sans différence significative. (14)

4.3 Adaptation hémodynamique et respiratoire des patients SANSINTERV et AVECINTERV

Les résultats nous montrent que, c'est surtout à l'effort maximal que les paramètres sont significativement différents entre les patients AVECINTERV et SANSINTERV. Nous avons trouvé que la valeur de METS max est significativement plus basse dans le groupe AVECINTERV, ce qui signifie que l'intensité de l'activité physique et la dépense énergétique qu'ils peuvent générer est moins élevée que dans le groupe SANSINTERV. La FCmax est plus élevée dans le groupe SANSINTERV. Rosenblum et Al. avaient trouvé des résultats similaires. (17) La plupart des paramètres d'effort maximal sont diminués chez les enfants qui ont eu une intervention pour une anomalie cardiaque. Il serait intéressant de savoir si la capacité physique diminuée s'explique par une fonction cardiaque réduite ou par un déconditionnement.

4.4 Algorithme de standardisation du choix du dispositif et du protocole

À partir des résultats que nous avons obtenus et d'informations retrouvées dans la littérature, nous avons établi un algorithme pour le choix du protocole en fonction des informations

suivantes : le patient est connu pour une cardiopathie ou pas ; l'indication de l'examen ; l'âge du patient ; l'activité sportive pratiquée par le patient et la taille du patient. (1)(4)(6)(11) En ce qui concerne le choix du protocole en fonction de l'information souhaitée, nous nous sommes basés sur le *Tableau 1*. (6)(11) Lorsque l'on veut évaluer une arythmie, une douleur thoracique à l'effort ou encore la pression artérielle à l'effort, le choix se portera plutôt sur le protocole de Godfrey pour une évaluation plus précise des arythmies et des signes d'ischémie à l'ECG et pour une évaluation plus précise de la pression artérielle.

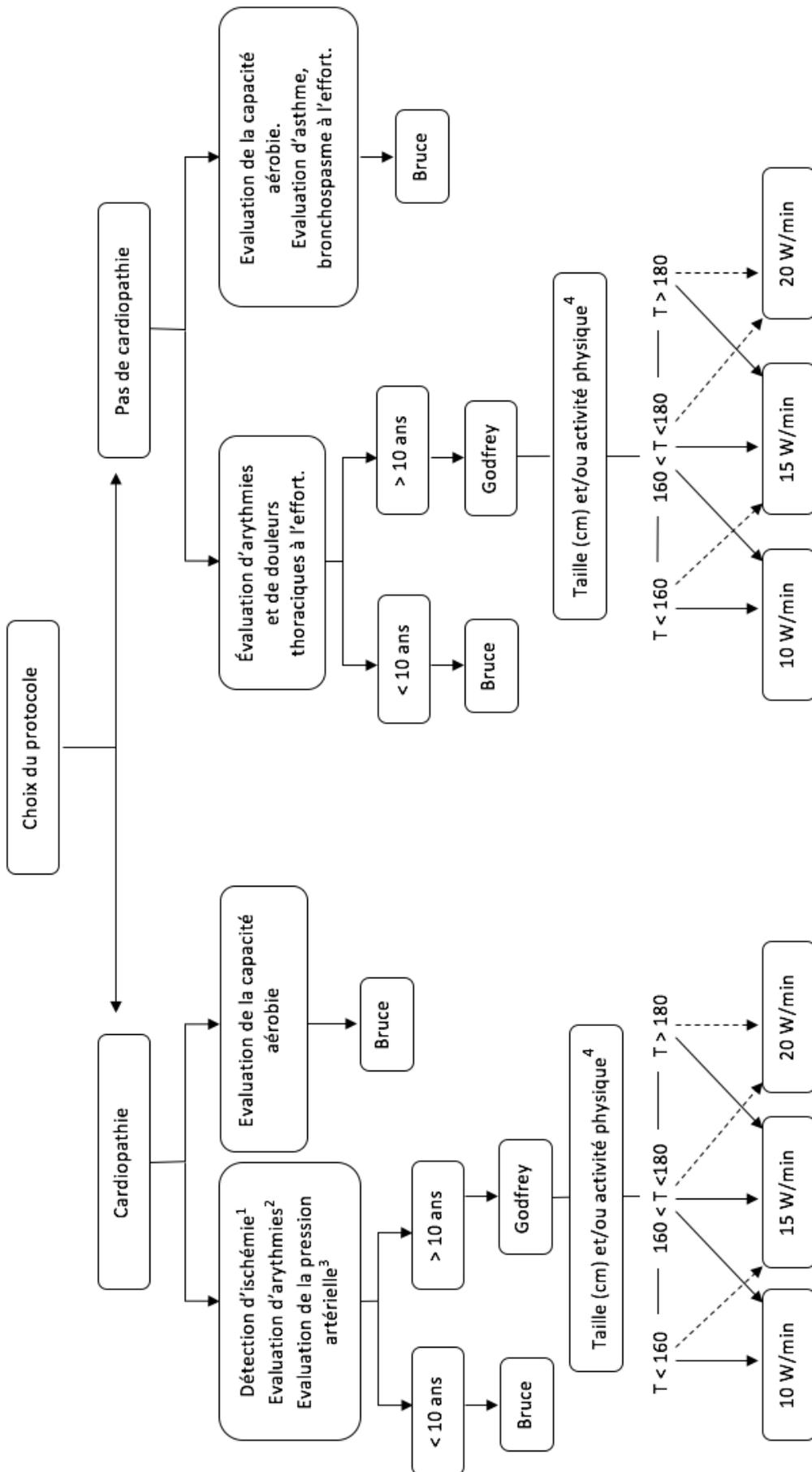
Le cut-off pour l'âge a été déterminé par les observations que nous avons pu faire. Parmi les enfants SANSINTERV, tous les enfants qui ont réalisé un CPET avec le protocole de Godfrey ont plus de 8 ans et parmi les enfants AVECINTERV, ils ont tous plus de 9 ans. Nous ne pouvons donc pas déterminer si la réalisation d'un test avec cycloergomètre en-dessous de 10 ans est faisable et approprié, mais en-dessus de 10 ans, la différence de pourcentage de tests aboutissant à un effort maximal, en fonction de s'il a été fait sur un cycloergomètre ou un tapis roulant, n'est pas très importante, indépendamment de la présence d'une cardiopathie (6% dans le groupe AVECINTERV et 10.3% dans le groupe SANS INTERV) (*Tableau 6* et *Tableau 7*).

De plus, dans notre expérience, les enfants trop jeunes n'arrivent pas à maintenir une cadence de pédalage favorable et n'arrivent donc pas à un nombre de tests ayant abouti à l'effort maximal optimal.

En ce qui concerne les cut-off de taille pour le protocole de Godfrey, nous avons retrouvé de grandes disparités entre ce qui est proposé dans la littérature et ce qui est applicable à la population pédiatrique suivi dans le service de Cardiologie pédiatrique. Les recommandations de la littérature, en ce qui concerne le protocole de Godfrey, sont les suivants : 10W pour les enfants < 120cm ; 15W pour les enfants de 120 à 150cm ; 20W pour les enfants >150cm (4). Dans la population pédiatrique suivie au CHUV, les enfants en dessous de 150cm, qui ont réalisé un test sur cycloergomètre ne sont que 14 sur les 161 enfants ayant réalisé un CPET sur cycloergomètre. Nous avons donc essayé d'adapter l'algorithme, en ce qui concerne le cut-off pour la taille, en fonction de la population de l'étude (*Figure 4*). En plus de la taille, l'activité sportive peut être un paramètre important à prendre en compte. Plus l'activité physique pratiquée sera importante et plus l'augmentation de charge par minute pourra être importante (1).

Nous n'avons pas inclus le genre dans l'algorithme, car nous n'avons pas trouvé de différence significative en ce qui concerne le choix du protocole et le genre de l'enfant, ainsi que sa capacité à atteindre l'effort maximal (*Tableau 4*). Nous n'avons pas observé de différences significatives en ce qui concerne l'atteinte de l'effort maximal en fonction de la charge (10W/min et 15W/min) dans le protocole de Godfrey et en fonction du genre. En ce qui concerne l'augmentation de charge de 20W/min, il n'y a que des garçons dans l'étude (cf. Annexes : *Tableau 13*).

Figure 3 : algorithme pour le choix du protocole en pratique



1. Détection d'ischémie à l'EKG. Ex. en cas de sténose/insuffisance de l'aorte réparé ou non, de transposition des gros vaisseaux réparés, anomalies des artères coronaires réparés ou non, ventricule unique fonctionnel.
 2. Évaluation d'arythmies à l'EKG. Ex. en cas de tétralogie de Fallot réparée, ventricule unique fonctionnel.
 3. Ex. en cas de coarctation de l'aorte réparée ou non réparée.
 4. Activité physique légère à modérée → et activité physique importante - - - - -

4.5 Limitations de l'étude

En ce qui concerne la détermination de l'effort maximal, nous avons estimé qu'il était atteint lorsque la fréquence cardiaque maximale est de 85% ou plus de la valeur prédite maximale ($220 - \text{âge du patient}$). Selon les recommandations de Paridon et Al. (1), les critères dans la détermination de l'effort maximal sont les suivants : $\text{RER} > 1.1$; FC s'approchant de 200 b/min ; opinion subjective du patient. Mais étant donné qu'il s'agit de données rétrospectives, les 3 critères ensembles étaient difficiles à obtenir.

Il se peut aussi qu'il y ait des problèmes au niveau de la classification AVECINTERV vs. SANSINTERV. Lorsque le patient a eu une intervention en dehors du CHUV, il ne fera pas partie de la base de données de chirurgie cardiaque et de cathétérisme (interventions), et ne sera pas considéré comme un patient AVECINTERV. De plus, certaines cardiopathies (ex. sténose aortique/pulmonaire modérée ou cardiomyopathie dilatée compensée) présentes chez les patients du groupe SANSINTERV peuvent être hémodynamiquement significatives.

En ce qui concerne les caractéristiques des enfants des deux groupes (groupe Bruce et groupe Godfrey), ils n'ont pas le même âge, la même taille, le même poids, ce qui peut occasionner un biais dans l'analyse des résultats. De plus, le nombre de CPET faites avec le protocole de Godfrey sur cycloergomètre est presque 3 fois inférieur au nombre de CPET faites avec le protocole de Bruce sur tapis roulant.

Dans le groupe AVECINTERV, les patients sont atteints de pathologies différentes et ont eu des interventions diverses, les conséquences hémodynamiques peuvent donc ne pas être les mêmes. Nous les avons tout de même rassemblé dans le même groupe.

Parmi les patients que nous avons choisi de regrouper dans le groupe AVECINTERV, nous ne savons pas précisément le délai écoulé entre l'intervention et la réalisation du CPET.

5. Conclusion

Le CPET reste un examen important dans l'évaluation et le suivi des pathologies cardiaques et pulmonaires, mais aussi dans l'évaluation de la capacité fonctionnelle pour des activités récréatives, sportives et professionnelles. Dans la littérature, les études restent cependant peu nombreuses et il n'existe pas de standardisation de la procédure.

Cette étude permet de faire un état des lieux de ce qui est actuellement réalisé au CHUV. Nous avons pu déterminer que le protocole le plus utilisé au CHUV est le protocole de Bruce et qu'il existe des différences significatives entre le CPET réalisé sur un tapis roulant et le CPET réalisé sur un cycloergomètre. Nous avons, entre autres, pu mettre en évidence que le protocole de Bruce sur tapis roulant permet d'atteindre l'effort maximal dans un plus grand pourcentage de patient que le protocole de Godfrey sur cycloergomètre. Mais l'atteinte de l'effort maximal n'est pas toujours le but principal et pour beaucoup de situations le cycloergomètre semble avantageux, notamment lorsque l'analyse de l'ECG est importante pour identifier des troubles du rythme ou des ischémies qui sont plus fréquentes chez les patients atteints d'une cardiopathie.

En ce qui concerne la comparaison des performances hémodynamiques et respiratoires des patients AVECINTERV et SANSINTERV, nous avons établi que le groupe SANSINTERV obtient de meilleurs résultats que le groupe AVECINTERV. Il aurait été intéressant de déterminer si cela est expliqué par une fonction cardiaque réduite ou un déconditionnement.

Une standardisation de la procédure du test d'ergospirométrie reste difficile à établir. À partir de nos résultats et de la littérature, nous avons tout de même pu proposer un algorithme décisionnel pour le choix du protocole en fonction de certaines caractéristiques du patient et des informations souhaitées du CPET.

Références

1. Paridon SM, Alpert BS, Boas SR, Cabrera ME, Caldarera LL, Daniels SR, et al. Clinical Stress Testing in the Pediatric Age Group: A Statement From the American Heart Association Council on Cardiovascular Disease in the Young, Committee on Atherosclerosis, Hypertension, and Obesity in Youth. *Circulation*. 18 avr 2006;113(15):1905-20.
2. Alpert BS, Verrill DE, Flood NL, Boineau JP, Strong WB. Complications of ergometer exercise in children. *Pediatr Cardiol*. 1 avr 1983;4(2):91-6.
3. Takken T, Blank AC, Hulzebos EH, van Brussel M, Groen WG, Helders PJ. Cardiopulmonary exercise testing in congenital heart disease: (contra)indications and interpretation. *Neth Heart J*. oct 2009;17(10):385-92.
4. Hebestreit H. Exercise testing in children — What works, what doesn't, and where to go? *Paediatr Respir Rev*. 1 janv 2004;5(Supplement 1):S11-4.
5. Buchfuhrer MJ, Hansen JE, Robinson TE, Sue DY, Wasserman K, Whipp BJ. Optimizing the exercise protocol for cardiopulmonary assessment. *J Appl Physiol*. 1 nov 1983;55(5):1558-64.
6. Takken T, Blank AC, Hulzebos EH, van Brussel M, Groen WG, Helders PJ. Cardiopulmonary exercise testing in congenital heart disease: equipment and test protocols. *Neth Heart J*. sept 2009;17(9):339-44.
7. Ortega FB, Ruiz JR, Castillo MJ, Sjöström M. Physical fitness in childhood and adolescence: a powerful marker of health. *Int J Obes*. 4 déc 2007;32(1):1-11.
8. Blais S, Berbari J, Counil F-P, Dallaire F. A Systematic Review of Reference Values in Pediatric Cardiopulmonary Exercise Testing. *Pediatr Cardiol*. 1 déc 2015;36(8):1553-64.
9. ATS/ACCP Statement on Cardiopulmonary Exercise Testing. *Am J Respir Crit Care Med*. 15 janv 2003;167(2):211-77.
10. Connuck DM. The role of exercise stress testing in pediatric patients with heart disease. *Prog Pediatr Cardiol*. 1 mai 2005;20(1):45-52.
11. Exercise testing in pediatrics. *Pediatr Clin North Am*. 1 déc 2004;51(6):1569-87.
12. Tomassoni TL. Role of exercise in the management of cardiovascular disease in children and youth. *Med Sci Sports Exerc*. avr 1996;28(4):406-413.
13. Chang R-KR, Gurvitz M, Rodriguez S, Hong E, Klitzner TS. Current Practice of Exercise Stress Testing Among Pediatric Cardiology and Pulmonology Centers in the United States. *Pediatr Cardiol*. 1 févr 2006;27(1):110-6.
14. LeMura LM, Duvillard SP von, Cohen SL, Root CJ, Chelland SA, Andreacci J, et al. Treadmill and cycle ergometry testing in 5- to 6-year-old children. *Eur J Appl Physiol*. 1 sept 2001;85(5):472-8.
15. Norozi K, Wessel A, Alpers V, Arnhold JO, Binder L, Geyer S, et al. Chronotropic Incompetence in Adolescents and Adults With Congenital Heart Disease After Cardiac Surgery. *J Card Fail*. 1 mai 2007;13(4):263-8.
16. Turley KR, Rogers DM, Harper KM, Kujawa KI, Wilmore JH. Maximal Treadmill versus

Cycle Ergometry Testing in Children: Differences, Reliability, and Variability of Responses. *Pediatr Exerc Sci.* 1 févr 1995;7(1):49-60.

17. Rosenblum O, Katz U, Reuveny R, Williams CA, Dubnov-Raz G. Exercise Performance in Children and Young Adults After Complete and Incomplete Repair of Congenital Heart Disease. *Pediatr Cardiol.* 1 déc 2015;36(8):1573-81.

Annexes

Figure 4: CPET avec le protocole de Godfrey ayant abouti à l'effort maximal en fonction de la taille de l'enfant et de la charge utilisée. (120-129.9 : n=1 ; 130-139.9 : n=3 ; 140-149.9 : n=6 ; 150-159.9 : n=26 ; 160-169.9 : n=39 ; 170-179.9 : n=30 ; 180-189.9 : n=10 ; 190-199.9 : n=0).

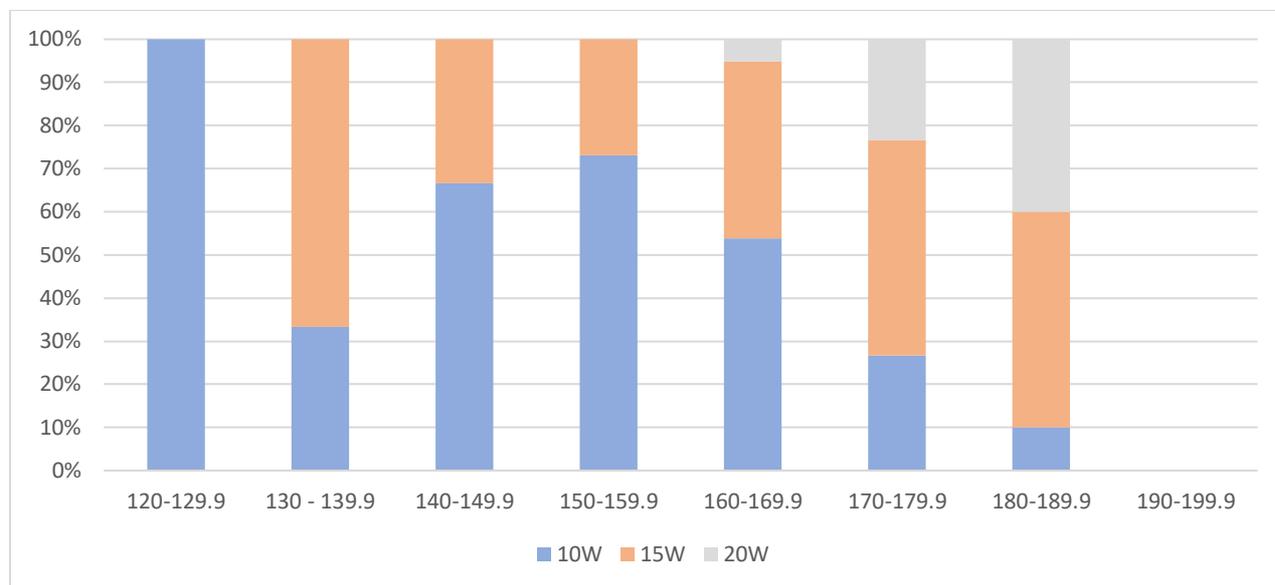


Tableau 13: Atteinte de l'effort maximal en fonction du genre et de l'incrémentation de charge par minute.

Charge	Genre	Tests sous-maximal (%)	Test maximal (%)	Valeur p
10 W/min	Filles (n=35)	22.86	77.14	p =0.34
	Garçons (n=43)	32.56	67.44	
15 W/min	Filles (n=18)	22.22	77.78	p =0.34
	Garçons (n=40)	12.5	87.5	
20 W/min	Filles (n=0)	-	-	-
	Garçons (n=17)	23.53	76.47	

Tableau 14: variables hémodynamiques et respiratoires prises au seuil de consommation d'oxygène maximale des patients SANSINTERV et AVECINTERV.

Paramètres	SANSINTERV	AVECINTERV	Valeur-p
FC: b/min (n=456)	182 (170 - 192)	168 (150.37 - 182)	p < 0.001
FR: c/min (n=469)	51.72 (45.45 - 60.91)	53.1 (45.71 - 63.83)	0.2366
Vt: L (n=469)	1.34 (1.01 - 1.73)	1.13 (0.81 - 1.53)	p < 0.001
VE: L/min (n=469)	70.55 (55.9 - 88.4)	60.2 (50.2 - 76.1)	p < 0.001
VO ₂ : mL/min (n=469)	2082.77 (1671.5 - 2599)	1673 (1281.82 - 2028)	p < 0.001
VO ₂ /Kg: mL/min/kg (n=469)	45.7 (38.25 - 55.55)	41.4 (30.59 - 48.9)	p < 0.001
VE/VO ₂ (n=469)	33 (29-37)	36 (32 - 42)	p < 0.001
VE/VCO ₂ (n=469)	33 (30 - 36.5)	37 (32.04 - 42)	p < 0.001
Pouls d'O ₂ (n=456)	11.18 (9 - 14)	10.10 (8 - 13)	p < 0.001
RER (n=469)	1.01 (0.94 - 1.09)	0.99 (0.91 - 1.08)	0.2247
RV: mL (n=396)	29.9 (18.6 - 40.3)	27.5 (16.94 - 43.2)	0.9606
Charge : W (n=398)	196.5 (142 - 252)	161.5 (127 - 235.5)	p < 0.05

Légende : FC : fréquence cardiaque ; FR : fréquence respiratoire ; Vt : volume courant ; VE : ventilation minute ; VO₂ : volume d'oxygène ; VE/VO₂ : équivalent ventilatoire en O₂ ; VE/VCO₂ : équivalent ventilatoire en CO₂ ; RER : ratio d'échange respiratoire ; RV : réserve ventilatoire.