



<http://portaildoc.univ-lyon1.fr>

Creative commons : Paternité - Pas d'Utilisation Commerciale -  
Pas de Modification 2.0 France (CC BY-NC-ND 2.0)



<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/fr>

Institut des Sciences et Techniques de Réadaptation  
Département Masso-Kinésithérapie

**Mémoire N° 1596**

Mémoire d'initiation à la recherche en Masso-Kinésithérapie

Présenté pour l'obtention du

**Diplôme d'Etat en Masso-Kinésithérapie**

Par

**VARENNE Nicolas**

Protocole de recherche et étude préliminaire

Quels sont les effets de la variation de la cadence de pédalage au cours d'un effort sous-maximal au seuil ventilatoire à puissance constante sur les échanges gazeux et la mécanique respiratoire dans la BPCO ?

What are the effects of cycling cadence variation during submaximal exercise at anaerobic threshold with constant power output on gas exchange and ventilatory mechanics in COPD ?

Directeur de mémoire

**CASSIRAME Johan**

**ANNEE 2019**

**Session 1**

Membres du jury

**CASSIRAME Johan**

**ROGOWSKI Isabelle**

**COCHET Anne**

**CHARTRE ANTI-PLAGIAT  
DE LA DRDJSCS AUVERGNE-RHONE-ALPES**

La Direction Régionale et Départementale de la Jeunesse, des Sports et de la Cohésion Sociale délivre sous l'autorité du préfet de région les diplômes paramédicaux et du travail social.

C'est dans le but de garantir la valeur des diplômes qu'elle délivre et la qualité des dispositifs de formation qu'elle évalue, que les directives suivantes sont formulées.

Elles concernent l'ensemble des candidats devant fournir un travail écrit dans le cadre de l'obtention d'un diplôme d'État, qu'il s'agisse de formation initiale ou de parcours VAE.

La présente charte définit les règles à respecter par tout candidat, dans l'ensemble des écrits servant de support aux épreuves de certification du diplôme préparé (mémoire, travail de fin d'études, livret2).

Il est rappelé que « le plagiat consiste à reproduire un texte, une partie d'un texte, toute production littéraire ou graphique, ou des idées originales d'un auteur, sans lui en reconnaître la paternité, par des guillemets appropriés et par une indication bibliographique convenable »<sup>1</sup>.

**La contrefaçon** (le plagiat est, en droit, une contrefaçon) **est un délit** au sens des articles L. 335-2 et L. 335-3 du code de la propriété intellectuelle.

**Article 1 :**

Le candidat au diplôme s'engage à encadrer par des guillemets tout texte ou partie de texte emprunté ; et à faire figurer explicitement dans l'ensemble de ses travaux les références des sources de cet emprunt. Ce référencement doit permettre au lecteur et correcteur de vérifier l'exactitude des informations rapportées par consultation des sources utilisées.

**Article 2 :**

Le plagiaire s'expose à des procédures disciplinaires. De plus, en application du Code de l'éducation<sup>2</sup> et du Code de la propriété intellectuelle<sup>3</sup>, il s'expose également à des poursuites et peines pénales.

**Article 3 :**

Tout candidat s'engage à faire figurer et à signer sur chacun de ses travaux, deuxième de couverture, cette charte dûment signée qui vaut engagement :

**Je soussigné(e) Mr VARENNE Nicolas, atteste avoir pris connaissance de la charte anti-plagiat élaborée par la DRDJSCS Auvergne-Rhone-Alpes et de m'y être conformé.**

**Je certifie avoir rédigé personnellement le contenu du mémoire fourni en vue de l'obtention du diplôme suivant : Diplôme d'Etat en Masso-Kinésithérapie.**

**Fait à Lyon 08, le 30/04/2019.**

**Signature :**



**Z**ér  **Plagiat**

<sup>1</sup> Site Université de Nantes : <http://www.univ-nantes.fr/statuts-et-chartes-usagers/dossier-plagiat-784821.kjsp>

<sup>2</sup> Article L331-3 : « les fraudes commises dans les examens et les concours publics qui ont pour objet l'acquisition d'un diplôme délivré par l'Etat sont réprimées dans les conditions fixées par la loi du 23 décembre 1901 réprimant les fraudes dans les examens et concours publics »

<sup>3</sup> Article L122-4 du Code de la propriété intellectuelle



Institut des Sciences et Techniques de Réadaptation  
Département Masso-Kinésithérapie

**Mémoire N° 1596**

Mémoire d'initiation à la recherche en Masso-Kinésithérapie

Présenté pour l'obtention du

**Diplôme d'Etat en Masso-Kinésithérapie**

Par

**VARENNE Nicolas**

Protocole de recherche et étude préliminaire

Quels sont les effets de la variation de la cadence de pédalage au cours d'un effort sous-maximal au seuil ventilatoire à puissance constante sur les échanges gazeux et la mécanique respiratoire dans la BPCO ?

What are the effects of cycling cadence variation during submaximal exercise at anaerobic threshold with constant power output on gas exchange and ventilatory mechanics in COPD ?

Directeur de mémoire

**CASSIRAME Johan**

**ANNEE 2019**

**Session 1**

Membres du jury

**CASSIRAME Johan**  
**ROGOWSKI Isabelle**  
**COCHET Anne**



Université Claude Bernard



Lyon 1

Président

**Frédéric FLEURY**

Vice-président CA

**REVEL Didier**

## **Secteur Santé**

U.F.R. de Médecine Lyon Est  
Directeur  
**RODE Gilles**

U.F.R de Médecine Lyon-Sud  
Charles Mérieux  
Directrice  
**BURILLON Carole**

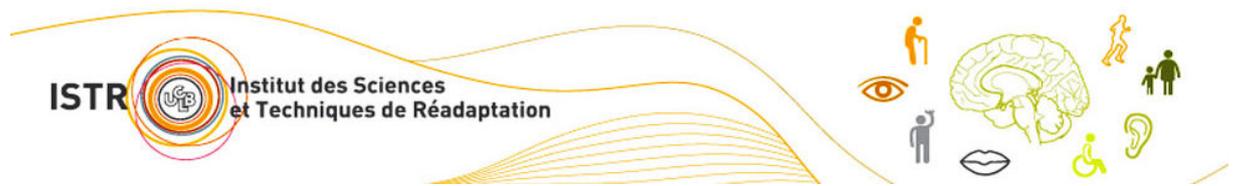
Département de Formation et  
Centre de Recherche en Biologie  
Humaine  
Directeur  
**SCHOTT Anne-Marie**

Comité de Coordination des  
Etudes Médicales (CCEM)  
**COCHAT Pierre**

U.F.R d'Odontologie  
Directeur  
**SEUX Dominique**

Institut des Sciences Pharmaceutiques  
et Biologiques  
Directrice  
**VINCIGUERRA Christine**

Institut des Sciences et Techniques de  
Réadaptation  
Directeur  
**Xavier PERROT**



## **Institut Sciences et Techniques de Réadaptation Département MASSO-KINESITHERAPIE**

Directeur ISTR  
**Xavier PERROT**

**Equipe de direction du département de masso-kinésithérapie :**

Directeur de la formation  
**Franck GREGOIRE**

Responsables des travaux de recherche  
**Samir BOUDRAHEM**

Référents d'années  
**Geneviève SANSONI**  
**Ilona BESANCON**  
**Dominique DALLEVET**  
**Samir BOUDRAHEM**

Référents stages cycle 1  
**Annie KERN-PAQUIER**

Référents stages cycle 2  
**Franck GREGOIRE**

Secrétariat de direction et de scolarité  
**Pascale SACCUCI**

*« La vie n'est ni un principe ni une résultante ; elle est la conséquence d'un conflit entre l'organisme et le monde extérieur. »*

Claude Bernard, Phénomènes de la vie, 1<sup>RE</sup> tome ,9<sup>ème</sup> leçons

*« La vie c'est comme une bicyclette, il faut avancer pour ne pas perdre l'équilibre »*

Albert Einstein

*« Seul le rythme provoque le court-circuit poétique et transforme le cuivre en or, la parole en verbe. »*

Léopold Sédar SENGHOR, Ethiopiques, Postface, 1956

## **Remerciements**

Cette reprise d'étude n'aurait jamais vu le jour sans l'aide et le soutien de nombreuses personnes durant ces 4 années. Je tiens à les remercier tout particulièrement.

### **A Monsieur Johan CASSIRAME,**

qui a bien voulu recroiser ma route et m'encadrer pendant deux ans sur ce mémoire, et pour qui j'ai le plus profond respect et admiration pour son énergie au travail. Son expertise sur la physiologie m'a été plus que bénéfique et m'a permis de développer un savoir scientifique. Je souhaite te remercier pour le temps précieux que tu m'as apporté tout au long de cette étude et dans la vie en général depuis notre rencontre.

### **A Madame Laurie ISACCO et Monsieur Gaël ENNEQUIN,**

qui m'ont apporté leur expertise scientifique au début de mon mémoire, et qui m'ont accueilli chez eux pendant l'étude préliminaire. Merci pour votre intérêt et votre disponibilité.

### **A Monsieur Didier BILLET,**

pour vos nombreux passages à la maison, pour le partage de vos compétences en kinésithérapie respiratoire qui m'ont permis de développer mon mémoire et mes connaissances dans ce domaine.

### **Aux responsables des différentes promotion à l'ISTR ainsi qu'aux personnels,**

une promotion de réforme n'est jamais simple à gérer et à organiser. Je tiens dans ce mémoire à vous remercier pour la formation de qualité que vous nous avez apporté pendant ses quatre années. Merci également de m'avoir donné ma chance en me permettant d'intégrer votre école par passerelle. Cela a apporté une nouvelle inertie dans ma vie. Merci.

### **Au CRCP des Hauts de Chazal,**

je remercie les sujets qui ont participé à cette étude préliminaire, à l'infirmière du CRCP et à la Odile FLEZ, cadre de santé MKDE au CRCP François, pour sa contribution au déroulement de cette étude.

Je remercie également Quentin Jacquinet qui a pu faire le lien entre mon sujet de mémoire et les envies du CRCP.

**A la société MATSPORT,**

pour m'avoir permis, il y a quatre ans, une reconversion professionnelle. Pour le prêt du matériel nécessaire lors de mes manipulations.

**A mes amis,**

et notamment Johan, James, Noémie, Chloé, Louis, Lucie pour votre soutien.

**A ma famille franco-allemande, mes parents, mon frère,**

Pour leur soutien à tout instant. Et notamment à mon grand frère pour son aide quand le problème se situait entre le dossier de la chaise et l'écran de l'ordinateur.

**Et enfin ma petite amie, Carolina BUCK,**

qui m'a accompagné quotidiennement et m'a toujours soutenu et conforté dans mes choix. Merci de ta patience et de ton amour.

## **Table des matières**

Table des matières.....	
Index des figures et tableaux .....	
Liste des abréviations et symboles .....	
Résumé.....	
Abstract .....	
I) Introduction : Justification scientifique de la recherche .....	1
1) Notion de base ventilatoire, sujet sain .....	1
a) Volume pulmonaire et ventilation au repos.....	1
b) Respiration à l'effort .....	4
c) Contrôle de la respiration .....	5
d) Notion de seuil ventilatoire, épreuve d'effort et d'exercice .....	7
2) Notion de puissance mécanique.....	10
3) La broncho-pneumopathie chronique obstructive (BPCO).....	10
a) Définition.....	10
b) Prise en charge de la BPCO .....	12
c) Réhabilitation respiratoire chez les patients souffrant de BPCO sévère .....	12
d) Limitation du patient BPCO sévère au cours d'un réentraînement à l'effort.....	13
e) Distension pulmonaire dynamique du BPCO.....	15
4) Paramètres respiratoires et fréquence de pédalage.....	15
5) Nouvelles perspectives de réentraînement à l'effort dans la BPCO .....	20
6) Résumé des bénéfices attendus.....	22
II) Objectifs de la recherche.....	23
1) Objectif principal.....	23
2) Objectifs secondaires .....	23
III) Méthode de recherche .....	24
1) Type de recherche.....	24
2) Organisation générale de l'étude .....	24
3) Déroulement de la recherche.....	28
a) Pré-tests :.....	28
b) Tests .....	29
c) Temps prévisionnel nécessaire .....	30
d) Calendrier des évaluations et des visites.....	30
4) Evaluations.....	31
5) Déviation du protocole .....	32

6)	Durée de la recherche .....	33
7)	Durée prévue de participation à la recherche.....	33
8)	Sortie d'étude d'un participant à la recherche .....	33
9)	Définition d'une fin d'étude.....	34
10)	Fin d'étude prématurée.....	34
11)	Participants à la recherche .....	34
12)	Modalités de recrutement .....	36
13)	Evaluation de la sécurité.....	36
IV)	Analyse statistique et présentation des résultats .....	36
1)	Plan statistique .....	36
2)	Définition de la population à analyser .....	36
3)	Description de l'échantillon étudié.....	37
4)	Seuil de signification statistique .....	37
5)	Analyse des résultats.....	37
6)	Méthode de prise en compte des données manquantes, inutilisées et non valides....	37
7)	Gestion des modifications apportées au plan d'analyse de la stratégie initiale.....	38
8)	Choix des personnes à inclure dans les analyses.....	38
V)	Considérations éthiques.....	38
VI)	Procédure administrative.....	39
VII)	Etude préliminaire : .....	43
1)	Objectifs de l'étude préliminaire .....	43
2)	Déroulement de la pré-étude .....	43
a)	Pré-tests.....	43
b)	Tests .....	44
3)	Calendrier des évaluations et visites :.....	45
4)	Temps prévisionnel nécessaire .....	46
5)	Exemple de planning .....	46
6)	Résumé de l'étude préliminaire .....	47
7)	Abstract of pilot study .....	48
8)	Etude préliminaire : Travaux non publiés .....	49

Références bibliographiques.....

ANNEXES .....

Annexe I : Résumé du protocole.....

## Index des figures et tableaux

Figure 1 : Volumes et capacité pulmonaire. ....	1
Figure 2 : respiration normale spontanée.....	3
Figure 3 : Elément de base du système de contrôle respiratoire. ....	5
Figure 4 : Mécanismes stimulant la ventilation à l'exercice.....	6
Figure 5 : Épreuve triangulaire pour la détermination de la PMA et VO <sub>2</sub> max .....	7
Figure 6 : A. Cinétique d'évolution des paramètres V'O <sub>2</sub> , V'CO <sub>2</sub> , et V'E lors d'un exercice maximal progressif.....	8
Figure 7 : Comment un poumon obstructif peut altérer les différents volumes et la capacité du poumon.....	11
Figure 8 : Relation VT-Ti et VT-V'E au repos et pendant un exercice.....	16
Figure 9 : Consommation d'O <sub>2</sub> lors de l'exercice à 40 et à 100 RPM.....	16
Figure 10 : Moyenne des valeurs de V'O <sub>2</sub> en fonction de la cadence de pédalage pendant deux périodes du test.....	17
Figure 11 : Temps jusqu'à épuisement à 60, 80, 100, et 120 RPM au cours d'un exercice incrémental. *P<0,05, différence significative entre les cadences. ....	18
Figure 12 : Calculs standards. En valeurs moyenne +/- l'écart type, % de gains d'un test à 60 RPM par rapport à un test à 30 RPM. ....	19
Figure 13 : tableau traduit de l'étude de Yentes et al. Boite à moustache de la médiane et de l'intervalle du quartile de la vitesse de marche. ....	20
Figure 14 : Déroulement de l'étude schématisé.....	28
Figure 15 : Représentation graphique de l'évolution de la puissance et de la cadence en fonction du temps pour la visite V1 CAD (L).....	28
Figure 16 : Représentation graphique de l'évolution de la puissance et de la cadence en fonction du temps pour la visite V2 CAD (+). ....	29
Figure 17 : Représentation graphique de l'évolution de la puissance et de la cadence en fonction du temps pour la visite V3 CAD (-). ....	30
Figure 18 : Déroulement de l'étude préliminaire schématisé.....	43
Figure 19 : Représentation graphique de l'évolution de la puissance et de la cadence en fonction du temps pour la visite CAD (+) de l'étude préliminaire.....	44
Figure 20 : Représentation graphique de l'évolution de la puissance et de la cadence en fonction du temps pour la visite CAD (-) de l'étude préliminaire.....	45
Figure 21 : Représentation graphique des valeurs moyennes du sujet 1 à CAD (-), CAD (L) et CAD (+). ....	54
Figure 22 : Représentation graphique des valeurs moyennes du sujet 2 à CAD (-), CAD (L) et CAD (+). ....	55
Figure 23: Graphiques statistiques des sujets représentant la standardisation de l'effet selon SD. a) : Sujet 1 ; b) Sujet 2. ....	57
Tableau I : calendrier prévisionnel des évaluations à réaliser aux différentes visites pour le protocole. ....	30
Tableau II : calendrier des évaluations réalisé aux différentes visites de l'étude préliminaire.....	45
Tableau III : Caractéristiques des sujets et cadences adoptées (moyenne ±SD). ...	52

## Liste des abréviations et symboles

ANOVA : analysis of variance (analyse de la variance)

BPCO : bronchopneumopathie chronique obstructive

BPM : battements par minutes

CAD (+) : condition où les sujets ont dû accélérer leur cadence

CAD (-) : condition où les sujets ont dû ralentir leur cadence

CAD (L) : condition où les sujets ont choisi librement leur cadence

CI : capacité inspiratoire

CO<sub>2</sub> : dioxyde de carbone

CPT : capacité pulmonaire totale

CRF : capacité résiduelle fonctionnelle

CV : capacité vitale

FC : fréquence cardiaque

FC max : fréquence cardiaque maximale

FPP : fréquence préférentielle de pédalage

Min : minute

O<sub>2</sub> : dioxygène

P : puissance

PaCO<sub>2</sub> : pression artérielle en dioxyde carbone

PaO<sub>2</sub> : pression artérielle en oxygène

PetCO<sub>2</sub> : pression en dioxyde de carbone en fin d'expiration

Pmax : puissance maximale

PMA : puissance maximale aérobie

Q<sub>r</sub> : quotient respiratoire

RPM : rotations par minutes (révolution par minutes)

s : seconde

SaO<sub>2</sub> : saturation artérielle d'oxygène

SpO<sub>2</sub> : saturation pulsée d'oxygène

SD : standard deviation (écart-type)

SV1 : premier seuil ventilatoire

T : période

Te : temps expiratoire

Ti : temps inspiratoire

VA : ventilation alvéolaire

V'CO<sub>2</sub> : débit expiré en dioxyde de carbone

V'E : débit ventilatoire

VES : volume d'éjection systolique

VEMS : volume expiratoire maximal en une seconde

V'O<sub>2</sub> : consommation d'oxygène par minute

V'O<sub>2max</sub> : consommation maximale d'oxygène par minute

V'O<sub>2peak</sub> : consommation pic d'oxygène par minute

VT : volume courant

VR : volume résiduel

VRE : volume de réserve expiratoire

VRI : volume de réserve inspiratoire

W : Watt

## Résumé

Le réentraînement à l'exercice fait partie intégrante de la réadaptation respiratoire, cependant même si des études ont permis d'affiner les intensités de travail, peut d'entre elles se sont intéressées à la motricité des patients durant ces exercices. De nouvelles modalités de réentraînement basé sur la motricité préférentielle du patient souffrant de Bronchopneumopathie chronique obstructive (BPCO) pourraient être intéressante pour l'optimisation du réentraînement. Chez le sujet sain, la fréquence de pédalage contrôlée et préférentielle est caractérisée par un coût énergétique plus faible ; chez les patients BPCO, elle pourrait permettre d'optimiser les échanges gazeux et le réentraînement. L'augmentation de la cadence chez le sujet sain entraîne une augmentation de la  $V'O_2$ ,  $V'E$  et  $VT$ , ce qui pourrait augmenter par la même la dyspnée, la fatigue musculaire et l'hyperinflation dynamique chez le sujet BPCO. Ces observations contrastent et questionnent sur le choix des fréquences de pédalage imposées aux patients en pratique courante. Si les fréquences de pédalage se situant aux alentours de 60 RPM sont bien tolérées en réadaptation cardiaque ; spécialité pionnière du réentraînement à l'effort, elles pourraient être inadaptées chez des patients souffrant de BPCO sévère et présentant une distension dynamique de repos et/ou d'effort.

Nous pensons qu'en variant cette fréquence mécanique, notamment vers des cadences préférentielles pour une même puissance, nous pourrions améliorer ou diminuer des paramètres d'échange gazeux, comme la diffusion alvéolo-capillaire, l'hyperinflation dynamique, la fatigue des muscles respiratoire et la dyspnée chez des patients atteints de pathologies respiratoire chronique.

**Mots-clés :** BPCO, cadence de pédalage, exercice modérée, fréquence respiratoire, kinésithérapie respiratoire, rééducation, réhabilitation, réponse cardio-ventilatoire, seuil ventilatoire, ventilation.

## **Abstract**

Exercise training is part of respiratory rehabilitation, however, although studies have helped to adjust work intensities, only a few focused in patient's motricity during these exercises. New exercise conditions based on the preferential motor skills of the patient suffering from chronic obstructive pulmonary disease (COPD) could be interesting for rehabilitation optimization. For healthy subjects, controlled and preferential cycling frequency leads to a low energy cost; it could allow COPD patients to optimize their gas exchange and training. For non-pathological people, the increase of cycling frequency results in higher oxygen demand rate, higher ventilatory rate and higher tidal volume, whereas it could intensify dyspnea, muscular fatigue and dynamic hyperinflation for COPD patients. According to these observations, one might question current terms of cycling frequency used in therapy of COPD patients. Even if cycling a frequency of 60 rpm might be appropriate in cardiac rehabilitation, it could be inappropriate for severe COPD patients, who suffer from dynamic distensions during exercise or at rest.

This study suggests that variation of this mechanic frequency with constant power output could improve or lower variables of gas exchange, like capillary action, dynamic hyperinflation, ventilatory muscular fatigue and dyspnea for COPD patients.

Key words: COPD, cycling frequency, moderate exercise, respiratory rate, physiotherapy, reeducation, rehabilitation, cardio-ventilatory answer, anaerobic threshold, ventilation.

## I) Introduction : Justification scientifique de la recherche

### 1) Notion de base ventilatoire, sujet sain

#### a) Volume pulmonaire et ventilation au repos

Les capacités ventilatoires peuvent être décrites en termes de volumes, de débits d'air pulmonaire mobilisés par le patient en inspiration et expiration (figure 1).

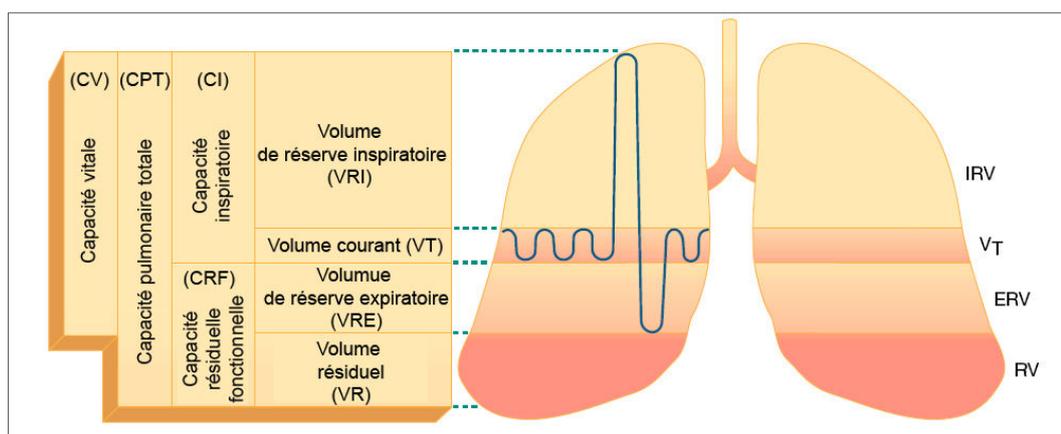


Figure 1 : Volumes et capacité pulmonaire. VT = volume courant ; VRI = volume de réserve inspiratoire ; VRE = volume de réserve expiratoire ; VR = volume résiduel ; CV = capacité vitale (VT+VRE+VRI) ; CPT = capacité pulmonaire totale (CV+VR) ; CI = capacité inspiratoire ; CRF = capacité résiduelle fonctionnelle. Schéma traduit et extrait du livre CARDIOPULMONARY ANATOMY AND PHYSIOLOGY, Page 144 chapitre 4, 4ème édition Delmar / Thomson Learning, auteur : Terry Des Jardins, Med, RRt.

Le volume courant ou tidal (VT) est défini comme le volume d'air spontanément mobilisé par les poumons pendant une respiration calme à chaque cycle respiratoire. Le volume de réserve inspiratoire (VRI) est le volume maximal d'air que l'on peut inhaler au-delà de l'inspiration normale d'un VT. Il est obtenu par une inspiration forcée.

Le volume de réserve expiratoire (VRE) est le volume maximal d'air que l'on peut expirer après expiration normale d'un VT. Il est obtenu par une expiration forcée.

Le volume résiduel (VR) est le volume d'air restant dans les poumons après une expiration forcée.

La capacité vitale (CV) est le volume maximum d'air qui peut être expiré après une inspiration forcée (VRI+VT+VRE). Il existe deux mesures principales de la CV. La

capacité vitale lente (CVL), dans laquelle l'expiration est effectuée lentement ; et la capacité vitale forcée (CVF), dans laquelle un effort maximal est fait pour expirer aussi rapidement que possible.

La capacité inspiratoire (CI) est le volume d'air qui peut être inhalé après une expiration normale ( $V_T + V_{RI}$ ).

La capacité résiduelle fonctionnelle (CRF) est le volume d'air restant dans les poumons après une expiration normale ( $V_{RE} + V_R$ ).

La capacité pulmonaire totale (CPT) est la quantité maximale d'air que les poumons peuvent accueillir ( $CI + CRF$ ).

La fréquence respiratoire de base d'un adulte sain est au repos d'environ 15 cycles par minute. Le débit ventilatoire lie dans une relation le volume courant ( $V_T$ ) et la fréquence respiratoire (FR). Il correspond au produit du volume courant par la fréquence respiratoire :

$$V'E = V_T \times FR$$

La fréquence par définition est égale à 1 divisé par la période :

$$FR = 1/T$$

La période, dans ce cas-là, représente un cycle respiratoire, et donc le temps entre inspiration et l'expiration :

$$T = \text{temps inspiratoire (Ti)} + \text{temps expiratoire (Te)}$$

Ainsi :

$$VE = V_T \times (1/(T_i + T_e))$$

De manière générale, nous avons un ratio inspiration-expiration, I:E = 1:2. Autrement dit, le temps nécessaire pour respirer normalement est d'environ la moitié du temps nécessaire pour expirer de la même manière.

Cependant, si l'on observe les débits gazeux, on remarque que le temps nécessaire pour inspirer et expirer au repos est à-peu-près le même (ratio de 1 : 1). La raison pour laquelle l'expiration est considérée deux fois plus longue que l'inhalation dans le rapport I:E est que le rapport inclut une pause expiratoire. Pendant cette pause, il n'y a pas d'écoulement de gaz et elle se produit à l'expiration finale dans le cadre de la phase d'expiratoire (Figure 2).

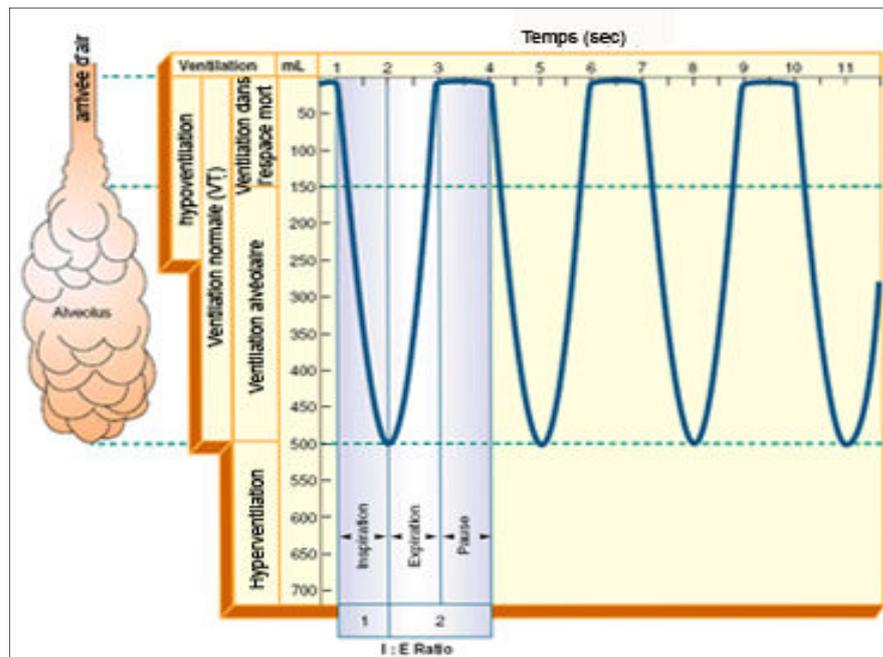


Figure 2 : respiration normale spontanée. Le ratio I:E est de de 1:2. Schéma traduit et extrait du livre CARDIOPULMONARY ANATOMY AND PHYSIOLOGY, Page 95 chapitre 2, 4ème édition Delmar / thomson learning, auteur : Terry Des Jardins, Med, RRt.

Cette pause normale qui se produit à la fin de l'expiration est généralement à-peu-près égale, en termes de temps, à la phase inspiratoire ou expiratoire. Ainsi, lorsqu'un individu est au repos, le temps nécessaire pour un cycle ventilatoire normal consiste en environ trois phases égales : une phase inspiratoire, une phase expiratoire et une phase de pause à la fin de l'expiration.

La quantité d'air entrant dans les poumons est légèrement plus élevée, car la quantité d'O<sub>2</sub> absorbée dépasse légèrement celle du CO<sub>2</sub> exhalé. Tout l'air qui passe par les lèvres n'atteint pas le compartiment gazeux alvéolaire permettant les échanges. Sur les 500ml d'air inhalés, 150ml restent dans l'espace mort anatomique (en arrière des alvéoles).

Le volume d'air frais disponible est donc égale à 350ml. Ce volume d'air frais permet la ventilation alvéolaire (VA).

Celle-ci est égale à :

$$VA = \text{Volume d'air frais} \times FR$$

Ce paramètre est de première importance, car il correspond à la quantité d'air frais disponible pour les échanges gazeux (Des Jardins, 2002 ; West & Andrew, 2018).

## b) Respiration à l'effort

Pour un exercice d'intensité faible et constant, le volume courant (VT) va d'abord augmenter plus vite que la fréquence respiratoire (FR). Le VT augmente progressivement, puis, quand il arrive à sa valeur maximale, la FR va augmenter.

Pour un exercice intense, la ventilation va encore devoir augmenter. L'individu va devoir augmenter soit le VT, soit la FR, ou encore les deux variables en même temps. L'organisme s'organise de la manière suivante : d'abord, c'est le VT qui augmente (l'organisme mobilise des parties des poumons qui ne sont pas mobilisées pour des efforts de faible intensité), puis, une fois la valeur maximale du VT atteinte (entre 50 et 60% de la capacité vitale), c'est la FR qui prend le relais et qui augmente pour permettre d'augmenter la quantité d'O<sub>2</sub> absorbée.

L'augmentation de la ventilation nécessite :

- Une augmentation de l'activité des muscles respiratoires qui permet une augmentation du VT et de la FR.
- Un recrutement des muscles respiratoires inactifs au repos.
- L'augmentation du volume courant se fait grâce à un plus grand mouvement du diaphragme s'écartant de plus en plus de sa position de relaxation.

Les muscles intercostaux sont progressivement recrutés (au repos, ces muscles intercostaux ne sont pas utilisés) pour pouvoir élargir la cage thoracique. Les ventilations extrêmes sollicitent aussi les respirateurs accessoires, notamment ceux de la base du cou. Lors de l'expiration, les abdominaux, par leur contraction, refoulent les viscères et le diaphragme et accélèrent l'expiration. Les intercostaux internes, muscles expirateurs, sont aussi recrutés lorsque la pression abdominale augmente.

Dans le cadre d'épreuve d'effort à incrémentation de la charge, on note une augmentation linéaire de la consommation d'O<sub>2</sub>. Mais au-delà d'un certain seuil, la V'O<sub>2</sub> reste constante, il s'agit de la V'O<sub>2</sub> max. La ventilation au début du test va augmenter également de manière linéaire, quand on la rapporte au travail ou à la V'O<sub>2</sub>. Mais pour de fortes V'O<sub>2</sub>, elle va augmenter plus rapidement en raison d'une libération d'acide lactique qui va amplifier le stimulus des centres de contrôle ventilatoire.

On note parfois une cassure nette de la pente du V'E, que l'on appelle le seuil anaérobie ou seuil ventilatoire. (Cf. I.1.d. Notion de seuil ventilatoire, épreuve d'effort et d'exercices).

De nombreuses fonctions de l'appareil respiratoire se modifient en réponse à l'exercice. La capacité de diffusion du poumon augmente, à la fois par augmentation de la capacité de diffusion membranaire et du volume de sang dans les capillaires pulmonaires (Des Jardins, 2002 ; West & Andrew, 2018).

### c) Contrôle de la respiration

La principale fonction du poumon est de permettre les échanges gazeux avec le sang. La régulation de ces échanges est rendue possible par la régulation de la ventilation. Les éléments de base de ce système de contrôle respiratoire sont : Les capteurs qui collectent l'information et la transmettent au contrôleur central du cerveau. Ce dernier coordonne l'information et, en retour, émet des influx vers des effecteurs, les muscles respiratoires, qui déterminent la ventilation.

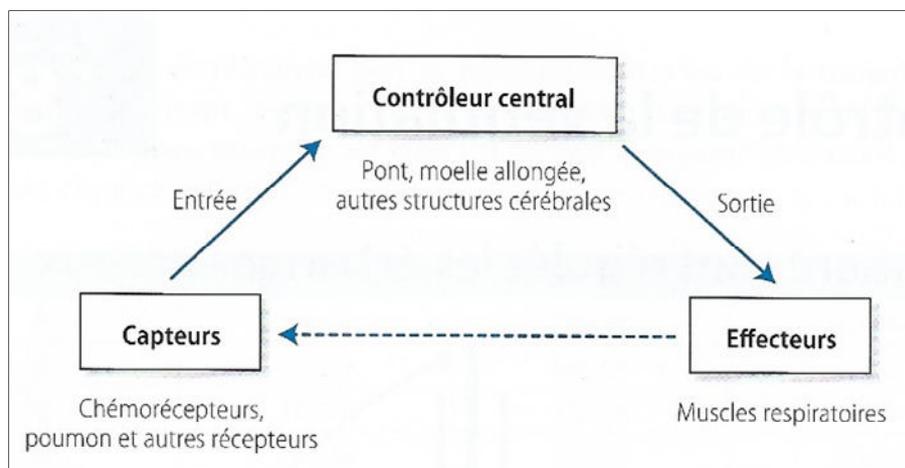


Figure 3 : Élément de base du système de contrôle respiratoire. L'information provenant de plusieurs capteurs est transmise au contrôleur central, dont les efférences vont aux muscles respiratoires. En modifiant la ventilation, ces derniers atténuent les perturbations perçues par les capteurs (rétrocontrôle négatif). Schéma extrait du livre *PHYSIOLOGIE RESPIRATOIRE L'ESSENTIEL*, Page 152 chapitre 8, Traduit de la 10ème édition américain, auteur : John B. West, Andrew M. Luks.

A l'effort, la ventilation s'élève rapidement et peut atteindre de très haut niveaux pour les exercices les plus extrêmes. Cette augmentation de la ventilation est étroitement liée à l'augmentation de la captation d'O<sub>2</sub> et à l'élimination de CO<sub>2</sub>. La cause de cette

augmentation de la ventilation à l'effort reste largement inconnue (West & Andrew, 2018).

La  $PCO_2$  augmente peu à l'effort et la  $PO_2$  varie en général que modérément, mais elle peut diminuer pour de très fortes intensités. Le PH sanguin reste constant lors d'exercices modérés, mais va fortement diminuer lors d'exercices à forte intensité, via la libération d'acide lactique induite par la glycolyse anaérobie. Ces trois mécanismes ci-dessus ne peuvent pas rendre compte de la si grande augmentation de la ventilation à l'effort.

D'autres stimulus sont aujourd'hui évoqués. Le déplacement passif des membres stimulerait la ventilation chez l'animal anesthésié et chez l'homme éveillé.

D'autres facteurs ont été suggérés, comme l'augmentation de la température qui stimulerait la ventilation ou alors la libération de chémorécepteurs centraux pour maintenir une  $PcO_2$  constante. Cependant, aucune des théories proposées n'est entièrement satisfaisante (Des Jardins, 2002 ; West & Andrew, 2018).

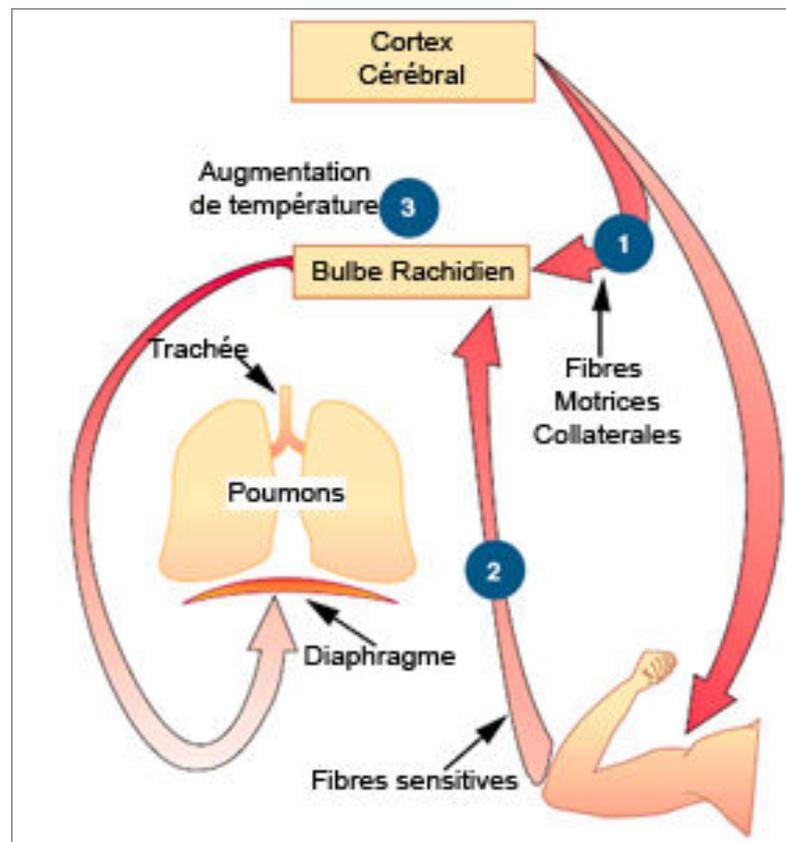


Figure 4 : Mécanismes stimulant la ventilation à l'exercice. (1) Les fibres collatérales viennent des motoneurones qui passent par la moelle épinière (ME) ; (2) les signaux sensoriels produits par le mouvement des membres sont envoyés à la ME ; (3) l'augmentation de la température produite par l'exercice va aussi stimuler la ventilation. Schéma traduit et extrait du livre CARDIOPULMONARY ANATOMY AND PHYSIOLOGY, Page 95 chapitre 2, 4ème édition Delmar / thomson learning, auteur : Terry Des Jardins, Med, RRT.

#### d) Notion de seuil ventilatoire, épreuve d'effort et d'exercice

Lorsque le niveau d'exercice devient supérieur à la capacité du système cardiopulmonaire et ne lui permet plus d'assurer un approvisionnement suffisant en  $O_2$  aux muscles, le métabolisme anaérobie augmente. Le point où le métabolisme anaérobie se développe s'appelle seuil anaérobie (anaerobic threshold (AT) ou seuil ventilatoire 1 (SV1) ) (Wasserman, Whipp, Koyl, & Beaver, 1973).

Le seuil ventilatoire peut être défini par plusieurs critères. Ceux-ci s'observent généralement lors d'une épreuve d'effort triangulaire en rampe ou palier (Figure 5).

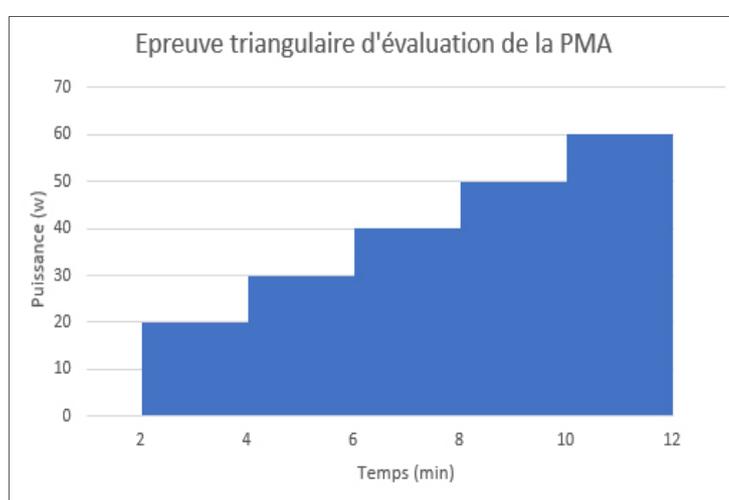


Figure 5 : Épreuve triangulaire pour la détermination de la PMA et  $VO_2$  max. Dans cet exemple le test débute par un échauffement de deux minutes à pédalage à vide. L'incrément est ensuite de 20W toutes les deux minutes.

La rupture ventilatoire est déterminée graphiquement à partir des courbes du  $V'E$  en fonction de la puissance d'exercice, de la  $V'CO_2$  en fonction de la  $V'O_2$  (courbe de Beaver) (Beaver, Wasserman, & Whipp, 1986) et de l'équivalent respiratoire en  $O_2$  ( $V'E/V'O_2$ ) (Wasserman et al., 1973). Il est recommandé de vérifier la cohérence du seuil ventilatoire déterminé sur chacune de ces courbes et, en cas de discordance, on détermine un positionnement moyen. De manière optimale, une double détermination visuelle par deux examinateurs doit être réalisée, puis confrontée.

Les critères sont les suivants :

L'augmentation de la pente  $V'E/V'O_2$  en fonction du temps (ou équivalent en  $O_2$  :  $EqO_2$ ) sans modification de la pente  $V'E/V'CO_2$  en fonction du temps (ou équivalent en  $CO_2$  :  $EqCO_2$ ).

L'augmentation de la pression télé-expiratoire en oxygène ( $PETO_2$ ) sans modification de la pression télé-expiratoire en  $CO_2$  ( $PETCO_2$ ) ;

La cassure de la courbe de Beaver ( $V'CO_2 / V'O_2$ ) avec une augmentation rapide de la  $VCO_2$  en fonction de la  $VO_2$  (Marcadet et al., 2018 ; Marthan, 2003 ; Richard & Costes, 2018).

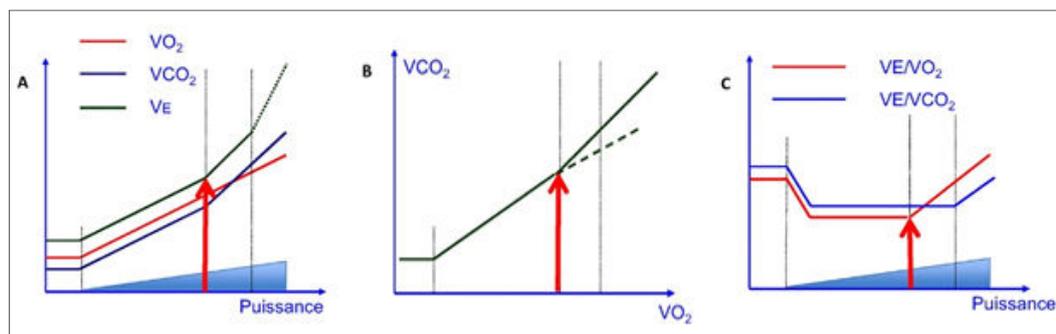


Figure 6 : A. Cinétique d'évolution des paramètres  $V'O_2$ ,  $V'CO_2$ , et  $V'E$  lors d'un exercice maximal progressif. L'incrément régulier de la charge est représenté par le triangle bleu. La cassure dans l'augmentation de la ventilation au niveau de la flèche correspond au SV1. B. Courbe de BEAVER ; l'augmentation de  $V'CO_2$  est exprimée en fonction de l'augmentation de  $V'O_2$ . Au-delà de SV1 (flèche), la  $V'CO_2$  augmente plus rapidement que la  $V'O_2$ . C. Courbes des équivalents respiratoires. En début d'effort, les équivalents respiratoires sont stables et constants ( $V'E/V'O_2$ ,  $VE/V'CO_2$ ). Au niveau du premier seuil ventilatoire (flèche),  $V'E/V'O_2$  augmente alors que  $V'E/V'CO_2$  reste stable. Schéma extrait de Réalisation et interprétation d'une épreuve d'effort avec mesure des échanges gazeux, Arch. Mal cœur Vaiss Prat 2018, AMCP 281 page 6, Richard et F. Costes.

La détermination de SV1 pour quantifier la charge de travail est généralement effectuée lors d'une épreuve incrémentée (épreuve d'effort ou d'exercice).

Concernant la pratique des épreuves d'effort sur bicyclette ergométrique chez l'adulte, la Société française de cardiologie recommande des protocoles habituels de 30 watts toutes les trois minutes (Marcadet et al., 2018 ; Pavy, Iliou, Vergès, Brion, & Monpère, 2011). Cependant, pour avoir une bonne régularité de la réponse à l'effort et notamment pour pouvoir mesurer la consommation en oxygène, les protocoles à montée régulière ont la faveur des spécialistes dans leurs recommandations (20 watts par minutes). En cas d'insuffisance cardiaque et chez les patients à risque, les paliers conseillés sont de dix watts par minute (Marcadet et al., 2018 ; Richard & Costes, 2018 ; Sellier, Monpère, & Broustet, 1997).

En pneumologie, plusieurs protocoles plus ou moins bien définis existent, souvent réalisés de manière empirique et pouvant varier d'une structure à une autre. Les protocoles d'exercice que l'on trouve le plus souvent sont de type incrémentiel avec une augmentation régulière de l'ordre de 5 à 25 W avec des paliers de 1 à 2 min (Marthan, 2003).

En théorie, le praticien devrait déterminer à l'aide d'équation la  $V'O_2$  max attendues chez le patient. Les malades étant surestimés avec ces équations, la valeur théorique peut être diminuée de 20 à 40 % (Cohen-Solal & Carré, 2009). Une estimation des capacités du sujet avant son épreuve d'effort doit permettre de cibler au mieux la puissance et la durée des paliers, afin d'amener le sujet au maximum de ses possibilités en 12 à 15 minutes.

On peut retrouver chez certains auteurs une diminution de cette  $V'O_2$  max théorique en fonction des résultats au VEMS. Cela permet de pondérer ainsi la puissance maximale attendue en fonction du rapport VEMS mesuré / VEMS théorique (Richard & Costes, 2018). Le calcul tient compte de la  $V'O_2$  théorique utilisée pour le pédalage à vide. L'effort débutera ensuite à 30% de la PMA théorique (PMT). Celle-ci peut être également indexée par rapport à la pathologie du patient.

#### Exemple d'application :

Homme de 65 ans, 180 cm, 75 Kg, VEMS 60% de la norme (-40%).

Test réalisé sur ergocycle électromagnétique :

La  $V'O_2$  max théorique est calculée par l'équation de COOPER et STORER validée pour ergocycle :

$$\begin{aligned} V'O_2\text{max théorique} &= [50,02-0,394 (\text{Age})] \times (\text{Poids}) \\ &= [50,02-(0,394 \times 65)] \times 75 \\ &= 1830,75 \text{ ml/min} \end{aligned}$$

La  $V'O_2$  théorique pour pédalage à vide ( $V'O_2T_{\text{vide}}$ ) se calcule par la formule suivante :

$$V'O_2T_{\text{vide}} = 5,8(\text{Poids}) + 151 = 586 \text{ ml/min}$$

La puissance maximale théorique :

$$PMT = (VO_2\text{maxT}-VO_2T_{\text{vide}}) / 10,3$$

$$\begin{aligned} &= (1830,75 - 586) / 10,3 \\ &= 120 \text{ W} \end{aligned}$$

(10,3 correspondants au coût énergétique moyen d'un watt)

Si on rapporte cela à la pathologie du patient, on peut alors imputer 40% (qui est son déficit en VEMS) à la PMT.

Cela nous donnera une PMT adaptée de 70 Watt pour notre patient.

Pour que l'épreuve dure environ 10-12 min, nous pourrions proposer à notre patient un test débutant à 20W avec une augmentation de 10W toutes les deux minutes ou 5W par minute), incluant deux minutes d'échauffement de pédalage à vide.

## 2) Notion de puissance mécanique

La puissance mécanique moyenne ( $P_{méca}$ ) sur un tour de pédale correspond au produit de la cadence de pédalage par le couple moteur appliqué sur les manivelles :

$$P_{méca} = \text{Force} \times \text{Cadence}$$

Elle s'exprime généralement en watts ou kilo pound meter (KPM/min-1). Avec l'équivalence  $1W = 6kpm/min-1$ .

Cette équation montre alors que la puissance mécanique est composée de deux variables : la cadence et le couple de force

## 3) La broncho-pneumopathie chronique obstructive (BPCO)

### a) Définition

« La BPCO est une maladie respiratoire chronique définie par une obstruction permanente et progressive des voies aériennes. La cause la plus fréquente est le tabagisme (plus de 80% des cas). Cette obstruction est causée par l'association, variable selon les patients, d'une diminution du calibre des bronchioles du fait de modifications anatomiques (remodelage) et d'une destruction des alvéoles pulmonaires (emphysème). Il s'y associe une réponse inflammatoire pulmonaire anormale à des toxiques inhalés (tabac, polluants, etc...) » (Lemarie, Valeyre, & Housset, 2010). La BPCO est une maladie lentement évolutive. Sa sévérité, jugée à l'aune du volume expiratoire maximal à la première seconde (VEMS), est classée du stade I (léger) à IV (très sévère). Classiquement, on parle de BPCO sévère lorsque le

VEMS est inférieur à 50% de la valeur de référence, comme défini par les critères de la Global Initiative for Chronic Obstructive Lung Disease (GOLD), car en dessous de ce seuil, la mortalité des patients augmente de façon significative. L'on peut observer dans cette pathologie chronique obstructive un changement de la ventilation et des volumes. Les rapports VR, VT, CRF et VR/CPT sont augmentés. Les CV, CI, VRI et VRE sont diminués (Figure 7).

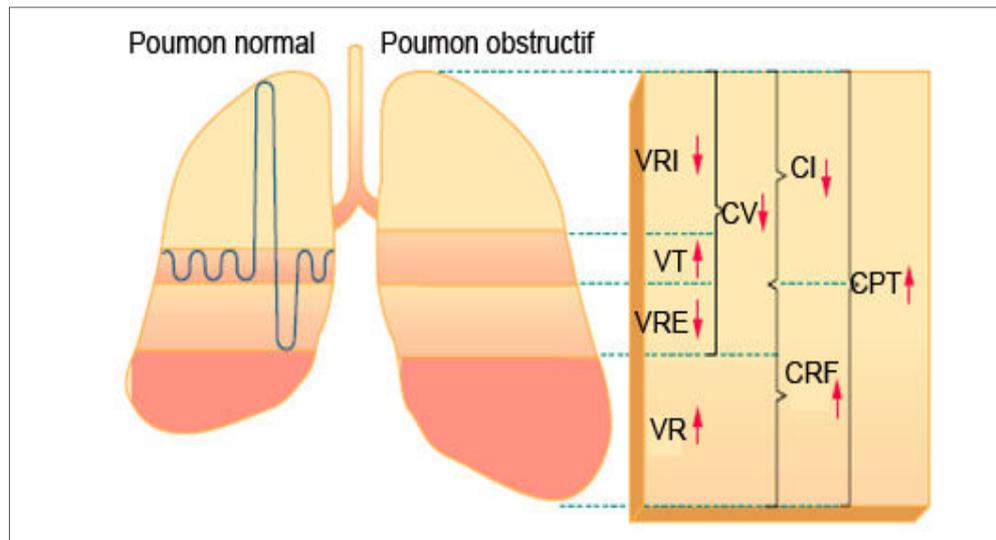


Figure 7 : Comment un poumon obstructif peut altérer les différents volumes et la capacité du poumon. VRI = Volume de réserve inspiratoire ; VT = Volume courant ; VR = Volume résiduel ; VRE = Volume de réserve expiratoire ; CPT = Capacité pulmonaire totale ; CV = Capacité vitale (VRE+VRI+VT) ; CI = Capacité inspiratoire (VRI+VT) ; CRF = Capacité résiduelle fonctionnelle (VRE+VR). Schéma traduit et extrait du livre CARDIOPULMONARY ANATOMY AND PHYSIOLOGY, Page 146, 4ème édition Delmar / thomson learning, auteur : Terry Des Jardins, Med, RRt.

En France, on estime que la prévalence de la BPCO est de 5 à 10% chez les adultes de plus de 45 ans (Fuhrman & Delmas, 2010), et qu'elle deviendrait d'ici 2030 la troisième cause de mortalité dans le monde, selon l'Organisation Mondiale de la Santé. La BPCO représente une importante source de dépenses publiques en France, puisque le plan BPCO 2005-2010 du ministère de la santé estimait les coûts liés à cette maladie à 3,5 milliards d'euros par an soit 3,5% de l'ensemble des dépenses de santé. De plus, le coût annuel de dépenses de santé est directement proportionnel à la sévérité de la maladie (Piperno, Huchon, Pribil, Boucot, & Similowski, 2003). Une partie seulement des dépenses est liée aux traitements médicamenteux (bronchodilatateurs et corticoïdes inhalés) et non-médicamenteux (réhabilitation, sevrage tabagique) ; l'essentiel des coûts de santé est attribuable aux hospitalisations pour exacerbations et aux conséquences des exacerbations sur l'absentéisme au

travail voire sur la perte d'autonomie. La BPCO est ainsi considérée comme un problème de santé publique (Fan, Ramsey, Make, & Martinez, 2007 ; Fuhrman & Delmas, 2010)

#### b) Prise en charge de la BPCO

D'une part, la prise en charge du patient atteint de BPCO repose en partie sur un traitement médicamenteux, défini en fonction du stade de la maladie et de l'historique des exacerbations dont l'objectif est de diminuer les symptômes (dyspnée en particulier) et de stabiliser les comorbidités.

D'autre part, la Haute Autorité de Santé (HAS) recommande la prescription d'un réentraînement à l'effort intégré à un programme de réhabilitation respiratoire (Bergman, Bianchi, Boyer, & Célérier, 2014), car c'est aujourd'hui le seul moyen thérapeutique permettant à la fois une réduction du risque d'hospitalisation et de la mortalité à la suite d'une exacerbation (Puhan et al., 2011), une diminution de la dyspnée et l'amélioration des capacités physiques, de l'état de santé et de la qualité de vie (Alfarroba, Rodrigues, Papoila, Santos, & Morais, 2016).

#### c) Réhabilitation respiratoire chez les patients souffrant de BPCO sévère

La réhabilitation respiratoire pluridisciplinaire est un élément clé de la prise en charge thérapeutique de la BPCO : elle est recommandée chez les patients atteints de BPCO modérée à sévère (stade II à IV) (Vestbo et al., 2013) et a démontré des résultats positifs sur la santé quel que soit le stade de la maladie (Alfarroba et al., 2016). La réhabilitation associe une optimisation de l'observance du traitement pharmacologique, une optimisation du mode ventilatoire, un soutien psychologique, une éducation thérapeutique et nutritionnelle et un réentraînement à l'effort (Lemarie et al., 2010). La réhabilitation respiratoire à la suite d'une exacerbation réduit la mortalité (Puhan et al., 2011 ; Puhan, Scharplatz, Troosters, & Steurer, 2005). Elle permet également l'amélioration des capacités physiques, de l'état de santé, de l'autonomie, du statut psychologique et de la qualité de vie (Bolton et al., 2013). Elle contribue enfin à diminuer la fréquence et la sévérité des exacerbations (Lemarie et al., 2010) et baisse donc les dépenses de santé (Rugbjerg, Iepsen, Jørgensen, & Lange, 2015).

Le réentraînement à l'effort est la pierre angulaire de la réhabilitation respiratoire. Dans la BPCO, il repose actuellement majoritairement sur des exercices en endurance. Son objectif est de permettre aux patients d'effectuer davantage de tâches dans leur vie quotidienne et de sortir du « cercle vicieux du déconditionnement » (Porszasz et al., 2005 ; Puente-Maestu et al., 2000 ; Sala et al., 1999). Les mécanismes d'amélioration passent par une action à la fois « périphérique » (amélioration des fonctions musculaire et vasculaire) et « centrale » (amélioration des fonctions cardiaque et parfois pulmonaire) (Porszasz et al., 2005 ; Puente-Maestu et al., 2000 ; Martijn A. Spruit et al., 2013).

La HAS fait apparaître dans ses recommandations concernant la rééducation des maladies cardio-respiratoires que l'activité doit être adaptée, personnalisée et réévaluée dans le temps en prenant en compte les souhaits du patient (Bergman et al., 2014). Les activités principales qu'elle souligne et qui ressortent des protocoles de réadaptation, sont la marche, la gymnastique, la bicyclette ergométrique, le renforcement musculaire périphérique et les techniques de kinésithérapie. L'intensité du réentraînement en endurance sur bicyclette ergométrique proposée est basée sur le seuil de dyspnée ou sur la fréquence cardiaque cible à 50-60 % de la puissance maximale observée lors de l'épreuve d'effort initiale, correspondant ainsi au seuil ventilatoire. Ou alors de manière plus précise, en utilisant une puissance dite puissance cible correspondant à la puissance développée par le sujet au moment du seuil ventilatoire. La Société française de cardiologie (Marcadet et al., 2018 ; Pavy et al., 2011) recommande une prescription de l'intensité de l'entraînement sous forme d'une fréquence cardiaque d'entraînement (FCE) cible, d'une puissance ou selon les sensations subjectives du patient. La FCE est définie par la fréquence cardiaque du sujet se situant dans une zone de fréquences cardiaques correspondant au SV1 ou juste en dessous, celle-ci étant déterminée à l'aide d'une épreuve d'effort cardio-respiratoire.

d) Limitation du patient BPCO sévère au cours d'un réentraînement à l'effort

De nombreux facteurs individuels ont été incriminés (limitation ventilatoire, dysfonction musculaire périphérique, cardiaque et métabolique), afin d'expliquer la moindre réponse au réentraînement à l'effort observée chez certains patients. Il semble que les

effets de la réhabilitation sont d'autant moins bons et d'autant plus inconstants que la maladie est sévère sur le plan de l'atteinte ventilatoire (Burtin et al., 2012).

En effet, dans la BPCO, la limitation à l'exercice chez le patient est principalement dite « ventilatoire » ayant pour origine une limitation de la quantité ventilée, mais aussi un phénomène fréquent appelé « distension » ou « hyperinflation » pulmonaire.

La distension pulmonaire correspond par définition à une augmentation anormale de la capacité résiduelle fonctionnelle (CRF), cette dernière étant supérieure à la limite supérieure de la normale. La distension dynamique en particulier est quasi systématique lorsque la BPCO est sévère (VEMS < 60% de la valeur de référence). Elle est due à la réduction des débits pulmonaires qui peut avoir deux conséquences : un temps d'expiration raccourci et/ou une augmentation de la fréquence respiratoire (FR) (réduisant le temps disponible pour l'expiration). Dans les deux cas, le résultat est l'incapacité à « vidanger » correctement les poumons et donc à atteindre le volume de relaxation normal, entraînant une augmentation de la CRF. Au cours d'un exercice physique, l'augmentation de la CRF limite l'augmentation normale du volume courant (Hayot, Ramonatxo, Matecki, Milic-Emili, & Prefaut, 2000 ; Vaz Fragoso, Clark, & Kotch, 1993). Le patient est donc contraint d'augmenter sa FR, afin d'augmenter sa ventilation pour répondre aux besoins de l'exercice, rendant sa respiration moins efficace, très coûteuse quant à la consommation d'O<sub>2</sub> (Shindoh et al., 1994) et majorant également le phénomène de distension. La distension dynamique limite donc l'augmentation de la ventilation en réponse à l'effort, pourtant nécessaire à l'apport accru en O<sub>2</sub>, au rejet de CO<sub>2</sub> produit en grande quantité dans les muscles, et au maintien de l'équilibre des paramètres sanguins (pressions artérielles en oxygène et dioxyde de carbone et pH).

Le poumon est incapable de retourner à son volume de relaxation normal et une pression intra-pulmonaire positive demeure en fin d'expiration. Ainsi, une partie de l'inspiration qui suit contribue à restaurer une pression neutre, avant de faire entrer l'air dans les poumons et donc d'être utile à la respiration. De plus, l'augmentation du volume de la cage thoracique place les muscles inspiratoires et le diaphragme (aplati) dans une posture défavorable de la courbe relation tension-longueur et diminue ainsi leur efficacité contractile (O'Donnell & Webb, 2008 ; Sergysels, Similowski, & Roche, 2008). La respiration devient donc plus coûteuse (effort supplémentaire des muscles inspiratoires), limitant considérablement l'effort en intensité et durée.

#### e) Distension pulmonaire dynamique du BPCO

Pour répondre à la demande accrue en oxygène au cours d'un exercice musculaire, la ventilation est stimulée. Ainsi, le patient augmente son VT, mais aussi sa FR, réduisant le temps disponible pour l'expiration et induisant/majorant ainsi le phénomène de distension dynamique. Or, la distension limite l'augmentation du VT. Pour répondre à la demande métabolique, le patient est contraint d'élever encore sa FR, afin d'augmenter sa ventilation et un véritable cercle vicieux se met alors en place (Hayot et al., 2000) aboutissant à une dyspnée pouvant précipiter l'arrêt de l'exercice. Ainsi, dans l'optique de limiter la distension dynamique, les travaux de recherche sur la qualité de la ventilation visant à réduire la fréquence respiratoire au repos et à l'exercice paraissent pertinents pour la prise en charge des patients souffrant de BPCO sévère.

Une étude a montré que l'amélioration qualitative de la respiration (légère augmentation du VT et diminution de la FR) à la suite d'un réentraînement à l'effort de six semaines augmentait la tolérance à l'effort (Richard Casaburi, 1998) probablement en lien avec une diminution du phénomène de distension dynamique.

#### 4) Paramètres respiratoires et fréquence de pédalage

Durant le pédalage concentrique, un couplage entre la fréquence de pédalage et la FR a été mis en évidence (Kohl, Koller, & Jäger, 1981). Ainsi pour une puissance donnée, la FR serait plus importante pour des fréquences de pédalage élevées (Takano, 1988).

Takano a montré chez des sujets sains non entraînés que, lors d'un test incrémental à 30 RPM et à 60RPM, les sujets avaient une augmentation significative de leur V'E pendant le test à cadence la plus rapide. Cette plus grande réponse ventilatoire était due à une augmentation de la fréquence par diminution de la période ; et cela avec notamment une diminution du temps expiratoire de la période ( $T_i$  ;  $T_e$ ), alors que le temps inspiratoire n'était pas significativement différent entre la condition 30 et 60 RPM. Cependant, aucune information sur les volumes expiratoires versus les volumes inspiratoires n'est mentionnée, ce qui ne nous permet pas de juger de l'écoulement de l'air.

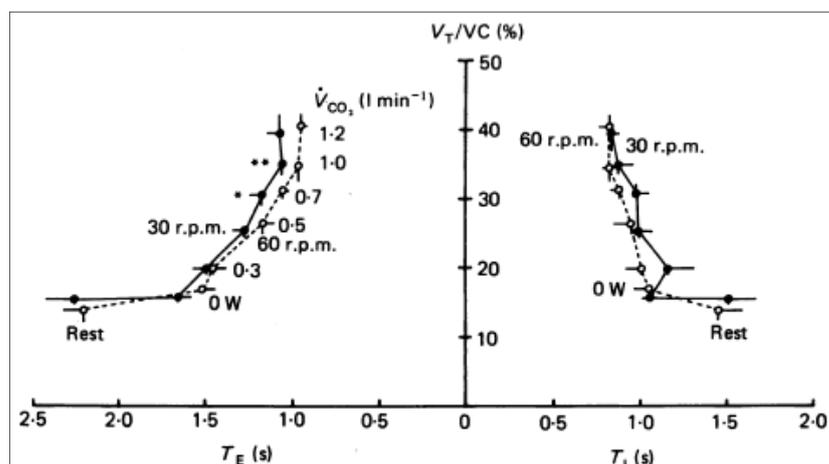


Figure 8 : Relation VT-Ti et VT -V'E au repos et pendant un exercice sur ergocycle sans charge (0W) suivi par une incrémentation de la charge à deux cadences différentes (60 RPM et 30 RPM).

Plus récemment, Zorgati et coll. (Housseem Zorgati et al., 2015) ont montré chez des sujets sains actifs, et non entraînés en cyclisme, une augmentation significative de  $\dot{V}O_2$ ,  $\dot{V}CO_2$ , V'E, et FC à 100 RPM versus 40 RPM sur des exercices rectangulaires modérés à puissance constante,.

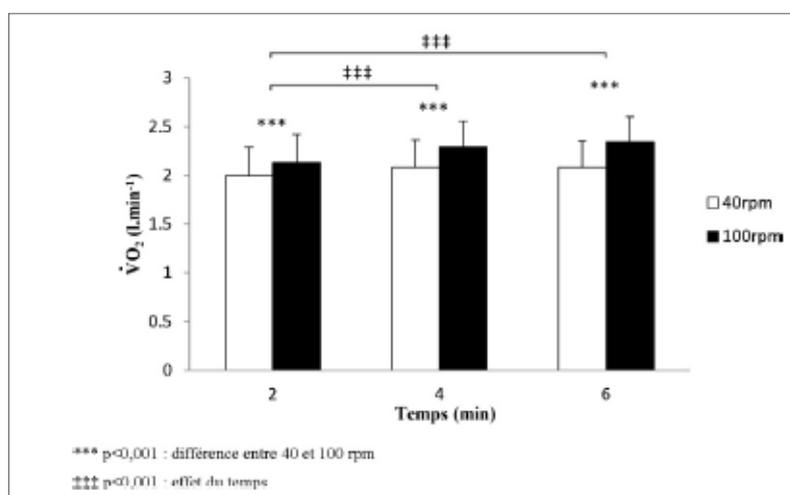


Figure 9 : Consommation d'O2 lors de l'exercice à 40 et à 100 RPM.

Chez le sujet sain, il y aurait alors une augmentation de la  $\dot{V}O_2$  et du V'E pour un exercice modéré et de haute intensité via l'augmentation de la fréquence de pédalage ; augmentation qui se ferait essentiellement par l'augmentation du VT.

Lepers et coll. (Lepers, Millet, Maffioletti, Hausswirth, & Brisswalter, 2001) ont examiné chez huit triathlètes l'effet de différentes cadences sur la réponse physiologique pendant un exercice sur vélo de type endurance (30 min à haute intensité). Les résultats de l'étude montrent une augmentation de la  $\dot{V}O_2$  et de la FC avec le temps

pour les trois conditions. A fréquence de pédalage rapide, le V'E et le QR (quotient respiratoire) sont supérieurs à +20% à la 5ème et à la 15ème min versus la condition de pédalage moins élevée. Cependant, à la 30ème minute, les auteurs notent aucune différence significative entre les deux conditions sur les variables FC et V'O<sub>2</sub>. Cela pourrait traduire la capacité d'adaptation de l'organisme des sujets entraînés au changement de cadence.

Brisswalter et coll. (Brisswalter, Hausswirth, Smith, Vercruyssen, & Vallier, 2000) se sont intéressés à la cadence énergétique optimale vs cadence librement choisie pendant le cyclisme et à l'effet de la durée d'exercice sur les paramètres respiratoires. Ils introduisent alors comme nouveau paramètre la notion de cadence préférentielle. Leur étude porte sur dix triathlètes entraînés. Ils ont observé la relation entre la cadence, la consommation d'O<sub>2</sub>, la FC et les paramètres ventilatoires à 80% de la V'O<sub>2</sub> max en fonction de la durée d'exercice. Les fréquences de pédalage étudiées étaient de 50, 65, 80, 95, 110 tours de pédale/min et la cadence libre de pédalage. Pendant un exercice de 30 minutes, les triathlètes entraînés choisissent une cadence proche de la cadence énergétique optimale. Les auteurs montrent également que la V'O<sub>2</sub> la plus basse et donc le moindre coût énergétique correspond à la fréquence de pédalage choisie préférentiellement. Avec le temps, les triathlètes vont augmenter leur V'O<sub>2</sub> pendant l'exercice. Là encore, la cadence préférentielle reste la moins coûteuse. Dans un second temps, on peut observer que la fréquence préférentielle augmente avec le temps par rapport à celle choisie au début de l'exercice.

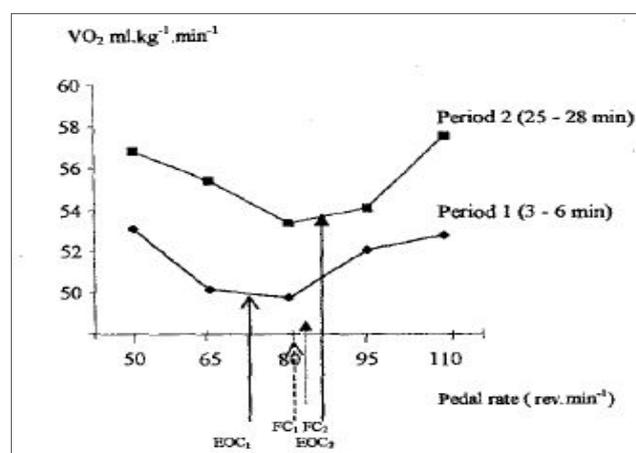


Figure 10 : Moyenne des valeurs de V'O<sub>2</sub> en fonction de la cadence de pédalage pendant deux périodes du test. Période 1 = 3 à 6 minutes ; période 2 = 25 à 28 minutes. EOC<sub>1</sub> : Moyenne des cadences énergétiquement optimales sur la période 1 ; EOC<sub>2</sub> : Moyenne des cadences énergétiquement optimales sur la période 2 ; FC<sub>1</sub> : Moyenne des cadences choisies librement pendant la période 1 ; FC<sub>2</sub> : Moyenne des cadences choisies librement pendant la période 2.

Lors d'un test incrémental chez le sujet sain, une relation parabolique entre la performance et la cadence a été observée. Chez des sujets entraînés la meilleure performance se situait à 80 RPM. La  $V'O_2$ max et la Pmax étaient significativement plus élevées à cette cadence. (Foss & Hallén, 2004). Il aurait pu être intéressant cependant de regarder ce qu'il se passait en terme de  $VO_2$  par palier lors du test. Et de voir ainsi la variation du coût énergétique en fonction de la cadence à chaque palier.

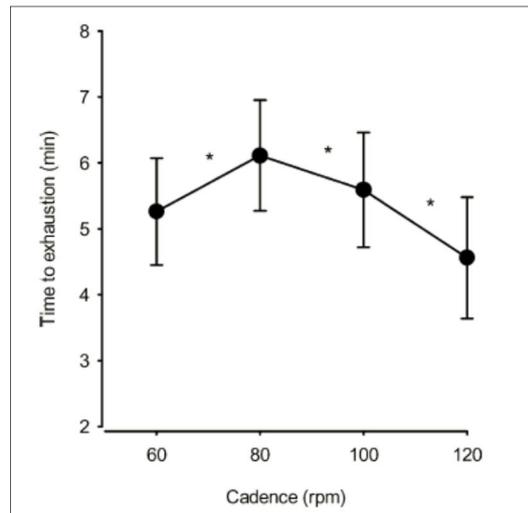


Figure 11 : Temps jusqu'à épuisement à 60, 80, 100, et 120 RPM au cours d'un exercice incrémental. \* $P < 0,05$ , différence significative entre les cadences.

Peu de données existent chez le BPCO et l'on trouve des données contradictoires avec ce qui a été énoncé plus haut pour l'athlète ou le sujet non entraîné sain. Une étude de Jérémie Rousseau (Rousseau & Cusenier, 2015) en vue du diplôme universitaire en kinésithérapie respiratoire et cardiovasculaire, sur l'analyse d'épreuves d'effort chez les BPCO à 60 RPM et 30 RPM, a pu montrer de manière globale une augmentation significative du  $V'E$  avec une augmentation significative du VT et non de la FR entre les deux conditions, en faveur de la cadence à 60 tours par minute.

n = 12	Tests (rpm)		% Gains
	30	60	
Mesures			
P	62,7 +/- 17,9	46,6 +/- 12,1	-25,74 **
VT	905,0 +/- 212,4	986,1 +/- 243,4	8,96 *
VE	19,2 +/- 6,6	22,0 +/- 7,4	14,29 *
VO2/KG	8,2 +/- 3,6	8,9 +/- 2,9	7,91
QR	0,87 +/- 0,07	0,95 +/- 0,08	9,00 **
Rés V	79,7 +/- 8,3	32,1 +/- 16,1	- 59,64 **
FC	110,1 +/- 13,4	112,7 +/- 13,1	2,35
FR	21,71 +/- 6,33	23,21 +/- 5,40	6,89
			** 0,01 * 0,05

Figure 12 : Calculs standards. En valeurs moyenne +/- l'écart type, % de gains d'un test à 60 RPM par rapport à un test à 30 RPM.

Cependant, les résultats dans cette étude sont obsolètes, car l'appareil présenté dans la méthodologie et utilisé lors de l'étude ne permet pas de moduler la charge en fonction de la fréquence de pédalage. En effet, celui-ci attribue un frein qui est dépendant de la fréquence de pédalage, car, pour garantir la validité de la puissance, le constructeur impose une cadence de pédalage entre 60-70 tours/min. Cela nous permet donc de douter de la validité des résultats obtenus. D'autre part l'auteur s'est intéressé uniquement aux valeurs dans leur globalité. Afin d'améliorer le réentraînement, il serait intéressant d'étudier plus précisément ce qui se passe à chaque palier.

Une analyse approfondie s'impose autour d'une intensité à SV1, car celui-ci est utilisé pour déterminer la charge d'entraînement des patients BPCO lors de leur protocole de réentraînement.

Une étude récente vient de montrer une altération du couplage respiratoire à la marche chez les patients BPCO versus les sujets sains (Yentes et al., 2019). Dans cette étude les expérimentateurs ont comparé des sujets sains à des sujets BPCO. Les paramètres observés ont été la vitesse de marche, la synchronisation de la marche et de la respiration, la gêne respiratoire et le coût énergétique. Cela dans trois conditions : vitesse de marche préférentielle, augmentation et diminution de la vitesse de plus et moins 20% par rapport à la vitesse préférentielle. Leur étude montre que la vitesse préférentielle de la marche des BPCO est plus faible que chez le groupe contrôle sain. Ils ont aussi mis en évidence que l'augmentation de la vitesse dans les trois conditions

permettait une diminution du coût énergétique. Les sujets BPCO avaient un couplage marche / respiration, plus fort que les sujets sains, mais moins complexe.

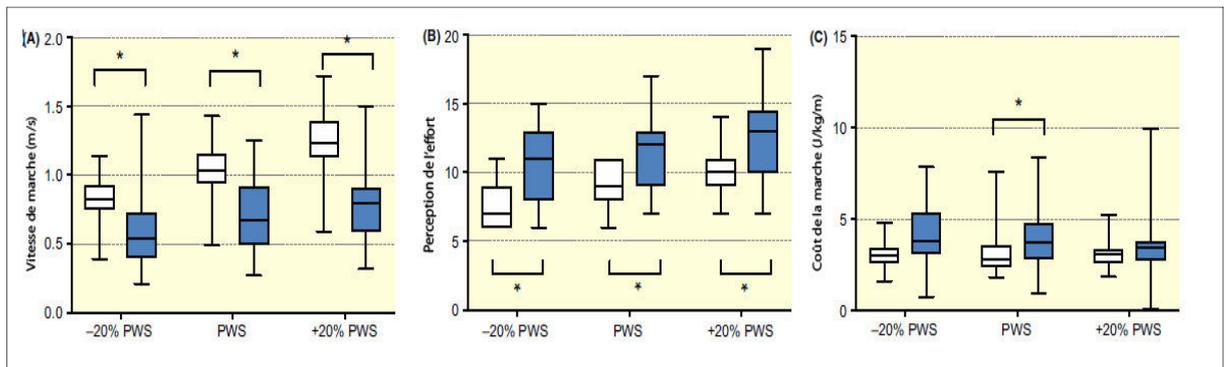


Figure 13 : tableau traduit de l'étude de Yentes et al. Boite à moustache de la médiane et de l'intervalle du quartile de la vitesse de marche (A), du taux de la perception à l'effort (B), et du coût du déplacement (C). Le groupe contrôle est représenté en blanc, et les patients BPCO en bleu. PWS est la vitesse de marche préférentielle ; \* indique  $P < 0,05$ .

Le volume de travaux réalisés chez le BPCO sur la préférence motrice et la cadence en comparaison aux résultats d'études chez le sujet sain reste très restreint. Cependant, il est légitime de suspecter une importante différence d'adaptation à l'effort entre les deux populations. Dans ce sens, le BPCO pourrait augmenter son débit ventilatoire lors d'une augmentation de fréquence de pédalage pour une puissance constante via son VT. Cette augmentation ne pourrait être que faible à cause de la pathologie qui induit une capacité vitale diminuée et une distension thoracique. L'augmentation de la FR pourrait augmenter mécaniquement à fréquence de pédalage rapide, mais pourrait augmenter en même temps l'hyperinflation dynamique. Avec le temps, l'on pourrait peut-être observer une limitation de l'appareil ventilatoire ne permettant pas d'augmenter la FR ou alors ne permettant qu'une augmentation temporaire. Les BPCO seraient particulièrement sujets à développer de la fatigue au niveau des muscles inspireurs durant l'effort (Shindoh et al., 1994). Cela pourrait expliquer cette incapacité à augmenter le V'E, ou en tout cas de le faire de manière prolongée comme le ferait le sujet sain pour s'adapter à l'augmentation de cadence.

## 5) Nouvelles perspectives de réentraînement à l'effort dans la BPCO

Dans la littérature actuelle, la notion de patients non-répondeurs (T. Troosters, Gosselink, & Decramer, 2001) laisse place à un questionnement sur l'adaptation individualisée des programmes proposés et cela notamment en termes de préférence

motrice. Cette préférence motrice sur ergocycle est proche de la cadence optimale énergétique chez le sujet sain, pour un exercice continu d'intensité faible à modérée (Brisswalter et al., 2000 ; Foss & Hallén, 2004 ; Takaishi, Yasuda, Ono, & Moritani, 1996). Le réentraînement mis en place dans le cadre de la réhabilitation respiratoire des patients porteurs d'une BPCO repose majoritairement sur l'exercice en endurance. Son objectif est de permettre aux patients d'effectuer davantage de tâches dans leur vie quotidienne et de sortir du « cercle vicieux du déconditionnement » (Porszasz et al., 2005 ; Puente-Maestu et al., 2000 ; Sala et al., 1999). Il est réalisé généralement sur cycloergomètre en raison de la garantie de la sécurité du patient (faible risque de chute) et de la facilité de contrôle par le thérapeute.

Les différents textes de la HAS sur les recommandations des bonnes pratiques sur la rééducation ne donnent aucune indication sur l'utilisation du paramètre de la fréquence de pédalage. Dans les recommandations sur les épreuves d'effort et d'exercice des différentes sociétés savantes (cardiologie, pneumologie, médecine du sport), on ne retrouve soit aucune indication sur les deux composantes de la puissance mécanique soit des recommandations de pédalage entre 60 et 70 RPM (Marcadet et al., 2018 ; Marthan, 2003 ; Pavy et al., 2011 ; Richard & Costes, 2018 ; Sellier et al., 1997). Il serait possible, cependant, que cela ne corresponde pas aux préférences motrices des patients et ainsi modifie le bilan initial ainsi que la capacité de travail des patients. La notion de cadence est donc souvent oubliée lors de l'utilisation de la puissance mécanique et cela tant au niveau du diagnostic qu'à celui de la réhabilitation. Cependant, il est important de la prendre en compte dans l'analyse et de la contrôler dans l'effort, car elle donne lieu à des réponses physiologiques différentes (Brisswalter et al., 2000 ; Foss & Hallén, 2004 ; Takaishi et al., 1996 ; Vercruyssen, Missenard, & Brisswalter, 2009 ; Houssein Zorgati et al., 2015a). D'un point de vue diagnostic, nous avons explicité ci-dessus que la  $V'O_2max$  pouvait être améliorée par la cadence lors de tests incrémentaux. Pour des patients devant répondre à des critères précis lors d'une greffe, notamment en termes de  $V'O_2max$ , il paraît judicieux de s'interroger sur les actuelles pratiques diagnostiques et de vérifier si cela est vrai pour le sujet malade (Vermes, 2018).

Sur le plan de la rééducation, cela pourrait expliquer que plus d'un tiers des patients porteurs d'une BPCO sévère qui réalisent une procédure de réhabilitation respiratoire incluant un réentraînement à l'effort ne bénéficient pas d'améliorations significatives en termes de capacités fonctionnelles et de qualité de vie (T. Troosters et al., 2001).

Il n'existe à notre connaissance aucune étude qui s'est intéressée à la relation entre fréquence respiratoire, fréquence de pédalage et rééducation chez le BPCO. Les résultats chez le sujet sain et la récente étude de Yentes et coll. sur la marche des BPCO, nous permettent de nous questionner sur les protocoles actuellement utilisés et sur leur adaptation en fonction de la pathologie et du paramètre RPM. Si les fréquences de pédalage se situant aux alentours de 60 RPM sont bien tolérées en réadaptation cardiaque elles pourraient être inadaptées chez des patients souffrant de BPCO sévère et présentant une distension dynamique de repos et/ou d'effort.

Il serait donc possible qu'à l'effort sous-maximal, pour une puissance constante, les BPCO puissent générer des réponses différentes de l'organisme, notamment en termes de débit ventilatoire (V'E), de fréquence respiratoire (FR), de volume courant (VT) De ce fait, il est également probable qu'ils puissent avoir une meilleure capacité à l'effort en modulant uniquement la fréquence de pédalage. Durant le pédalage concentrique, un couplage entre la fréquence de pédalage et la FR a été mis en évidence (Kohl et al., 1981). Les fréquences plus hautes au SV1 chez le sujet sain entraînent une augmentation du V'E, du VT, de la V'O<sub>2</sub> et de la fréquence respiratoire (Brisswalter et al., 2000 ; Lepers et al., 2001 ; Mitchell et al., 2019 ; Takano, 1988 ; H. Zorgati, Amiot, Collomp, Larue, & Prieur, 2013 ; Housseem Zorgati et al., 2015). En variant cette fréquence mécanique, notamment vers des cadences préférentielles pour une même puissance, nous pourrions améliorer ou diminuer des paramètres d'échanges gazeux comme la diffusion alvéolo-capillaire, l'hyperinflation dynamique, la fatigue des muscles respiratoires et la dyspnée chez des patients atteints de pathologies respiratoires chroniques.

Il serait donc intéressant d'observer ces réponses ciblées à l'exercice sous-maximal, qui - nous le rappelons - constitue la charge d'entraînement actuellement utilisée chez les BPCO. Il s'agit, dans un premier temps, d'une simple modulation de la fréquence mécanique à puissance constante qui est utilisée habituellement pour leur rééducation. Cela permettra d'en dégager des mécanismes respiratoires, afin d'adapter au mieux notre programme de rééducation au patient.

Dans notre étude nous souhaitons évaluer les effets de la variation de la fréquence mécanique au cours d'un effort sous-maximal au seuil ventilatoire sur les échanges gazeux et la mécanique respiratoire pour une même puissance donnée chez le BPCO.

## 6) Résumé des bénéfices attendus

Dans le cadre de la BPCO, la réadaptation permet une réduction de la mortalité de 35% en moyenne (Roversi, Fabbri, Sin, M. Hawkins, & Agustí, 2016). Elle permet également l'amélioration des capacités physiques avec un recul de la dyspnée et de la fatigue, l'augmentation de la distance parcourue aux tests de marche de six minutes et un gain sur l'autonomie et la qualité de vie (Jónsdóttir, Andersen, Sigurosson, & Sigurosson, 2006). La dégradation de la fonction musculaire (métabolisme oxydatif et capacité à générer une force) est particulièrement marquée chez ces patients (Seymour et al., 2010). L'entraînement entraîne une amélioration des capacités oxydatives musculaires avec une augmentation d'environ 20 % du pic de consommation d'oxygène et d'environ 30 % de la force générée par les muscles des membres inférieurs (M. A. Spruit, Gosselink, Troosters, De Paepe, & Decramer, 2002). De manière générale, la réadaptation pulmonaire est l'un des traitements les plus puissants pour les patients avec des maladies respiratoires. Les chercheurs devraient continuer à peaufiner les interventions, obtenir des précisions sur la terminologie ainsi que les résultats finaux de la réadaptation pour assurer des effets durables sur la santé (Thierry Troosters, Blondeel, Janssens, & Demeyer, 2019).

## **II) Objectifs de la recherche**

### **1) Objectif principal**

L'objectif principal de notre étude est d'observer l'effet de la fréquence de pédalage sur la respiration et les échanges gazeux pour une puissance constante durant un effort sous-maximal au seuil ventilatoire chez le BPCO ; sont observés alors les paramètres ventilatoires et les échanges gazeux en fonction de notre protocole.

### **2) Objectifs secondaires**

Comme objectifs secondaires, nous nous sommes fixés l'observation de l'effet de la cadence sur la FC, la SpO<sub>2</sub> et la dyspnée. Nous voudrions voir aussi s'il existe des différences de choix de la fréquence de pédalage préférentielle au SV1, entre l'exercice progressif (Test PMA) et l'exercice continu (Test cad libre). De plus, nous souhaiterions dégager les implications et recommandations pour la prise en charge de ces patients.

### III) Méthode de recherche

#### 1) Type de recherche

Il s'agit d'une étude expérimentale randomisée.

#### 2) Organisation générale de l'étude

Une présentation générale de l'étude sera faite pendant un temps balisé dans l'emploi du temps des patients un mois avant le début de l'étude. Au moins une semaine avant la visite d'inclusion V0, les sujets volontaires auront un entretien téléphonique avec l'investigateur principal au cours duquel le protocole leur sera présenter.

A l'issue de cet entretien, la notice d'information et le formulaire de consentement éclairé leur seront transmis par email avec la possibilité de joindre les investigateurs pour obtenir des informations complémentaires.

Ils auront donc alors au minimum une semaine de réflexion avant de se rendre à la visite d'inclusion V0.

#### Visite d'inclusion = V0 :

Lors de cette visite, la présentation du protocole sera réitérée et une présentation des outils, des locaux et du personnel aura lieu. Les expérimentateurs recueilleront le consentement écrit et éclairé de tous les sujets. Les critères d'inclusion et de non-inclusion seront vérifiés.

L'investigateur principal devra recueillir :

- Le consentement éclairé du participant ;
- Attribuer un numéro d'identification (NI) aux sujets dans l'ordre chronologique ;
- Réitérer la présentation du protocole ;
- Présenter les outils, les locaux et le personnel ;
- Pratiquer une anamnèse médicale ;
- Vérifier les critères d'inclusion et non-inclusion.

Ensuite, un des investigateurs associés donnera les explications suivantes aux volontaires :

- Les sujets ne devront pas modifier leurs activités physiques et sportives pendant l'étude.

- Les sujets ne devront pas modifier leurs habitudes alimentaires pendant l'étude.
- Les sujets ne devront pas faire d'excès dans les deux jours qui précèdent les différentes visites (alimentation, alcool et sport).
- Les sujets ne devront pas fumer pendant l'étude.
- Les sujets ne devront pas débiter un nouveau traitement, sauf extrême nécessité.
- Un planning de passage leur sera également donné.

#### Visite test PMA = T1 :

Une à deux semaines après V0, les sujets se rendront dans les locaux en fonction de leur planning. Une présentation du protocole leur sera alors réitérée et une présentation des outils, des locaux et du personnel aura lieu de nouveau. Une familiarisation avec les tests sportifs sera effectuée. Cette visite comportera également le recueil de différentes données anthropométriques et l'évaluation de la composition corporelle (Durnin & Womersley, 1974). Dans un premier temps, les volontaires réaliseront une spirométrie.

Dans un second temps, ils effectueront une épreuve d'exercice sur cyclo-ergomètre avec mesure des échanges gazeux. A l'issue de ce test, nous obtiendrons la puissance maximale aérobie (PMA) et le seuil ventilatoire (SV1) ainsi que les variables physiologiques attendues pour chaque sujet

L'épreuve fonctionnelle d'exercice métabolique sera pratiquée sur bicyclette ergométrique (cf. paragraphe III.4. Évaluations) avec monitoring continu des gaz inspirés et expirés [ventilation minute ( $V'E$ ), du débit d'oxygène consommé ( $V'O_2$ ) et du débit de dioxyde de carbone rejeté ( $V'CO_2$ )] (cf. paragraphe III.4. Évaluation), de la saturation artérielle en oxygène et de l'électrocardiogramme 12 dérivations (General Electric Healthcare, Chicago, USA). L'épreuve « triangulaire » comporte une période d'échauffement de deux minutes, suivie d'un exercice incrémentiel réalisé selon un protocole en créneaux jusqu'à épuisement. La puissance (exercice et créneaux) sera adaptée à l'état clinique des patients.

Pendant cette épreuve aucune indication de fréquence de pédalage n'est donnée au patient. Il est demandé de pédaler à la vitesse à laquelle le sujet possède le plus grand confort.

Des mesures de la gazométrie de sang capillarisé prélevé à l'oreille et de la lactatémie seront effectuées au repos, au seuil et au pic de l'exercice. Le seuil ventilatoire sera déterminé conjointement par :

L'augmentation de la pente  $V'E/V'O_2$  en fonction du temps (ou équivalent en  $O_2$  :  $EqO_2$ ) sans modification de la pente  $V'E/V'CO_2$  en fonction du temps (ou équivalent en  $CO_2$  :  $EqCO_2$ ) ;

L'augmentation de la pression télé-expiratoire en oxygène ( $PETO_2$ ) sans modification de la pression télé-expiratoire en  $CO_2$  ( $PETCO_2$ ) ;

La cassure de la courbe de Beaver ( $V'CO_2 / V'O_2$ ) avec une augmentation rapide de la  $VCO_2$  en fonction de la  $VO_2$ .

Deux expérimentateurs experts feront cette interprétation, afin de réduire l'erreur.

L'investigateur principal devra recueillir :

- Les différentes variables pendant l'exercice (paramètres d'échanges gazeux, FC,  $SpO_2$ , Pa) ;
- Répéter la présentation du protocole ;
- Présenter les outils, les locaux et le personnel + familiarisation avec les outils.
- Recueillir les données démographiques (date de naissance, taille, poids) et évaluer la composition corporelle du sujet via la méthode des plis cutanés ;
- Recueillir la dyspnée via l'EVA ;
- Relever les éventuels traitements concomitants ;
- Relever les éventuels événements indésirables.

Visite V1 = CAD (L) :

Une semaine après T1, les sujets reviendront au centre, afin d'effectuer un nouvel exercice physique sur cycloergomètre (CAD (L)). Il s'agira d'un exercice de cinq minutes à puissance constante correspondant à celle constaté pendant le test initial à SV1. Lors de cet exercice sera recueilli la fréquence de pédalage préférentielle (FPP). Un échauffement de 3 min à 50% de la puissance obtenue à SV1 sera effectué. L'épreuve continuera ensuite sans interruption par un exercice de 5 minutes à la puissance correspondant au SV1 à une fréquence de pédalage choisie librement par le sujet.

L'investigateur principal devra recueillir :

- La fréquence de pédalage préférentielle ;

- La sensation de la difficulté de l'effort à 2min30s et à la fin de l'exercice via l'EVA ;
- Les différentes variables pendant l'exercice (paramètres d'échanges gazeux, FC, SaO<sub>2</sub>, Pa) ;
- La température et l'hygrométrie au début et à la fin du test ;
- Relever les éventuels traitements concomitants ;
- Relever les éventuels évènements indésirables.

#### Visite V2= CAD (+) :

Au moins 72h après V1, les sujets reviendront au centre, afin d'effectuer un nouvel exercice physique sur cycloergomètre (CAD (+)). Il s'agira d'un exercice de 5 min à la puissance correspondant à SV1. La fréquence de pédalage imposée sera supérieure de 15% à la FPP. Ensuite, les sujets effectueront une période de repos de 8 min. Puis, ils feront un nouvel exercice de 5 minutes à la puissance correspondant au SV1 avec une fréquence de pédalage imposée supérieure de 25% à la FPP.

L'investigateur principal devra recueillir :

- Le contrôle de la fréquence de pédalage ;
- La sensation de la difficulté de l'effort à 2min30s et à la fin de l'exercice via l'EVA ;
- Les différentes variables pendant l'exercice (paramètres d'échanges gazeux, FC, SaO<sub>2</sub>, Pa) ;
- La température et l'hygrométrie au début et à la fin du test ;
- Relever les éventuels traitements concomitants ;
- Relever les éventuels évènements indésirables.

#### Visite V3 = CAD (-) :

Au moins 72h après V2, les sujets reviendront au centre, afin d'effectuer un nouvel exercice physique sur cycloergomètre (CAD (-)). Il s'agira d'un exercice de 5 min à la puissance correspondant au SV1 avec une fréquence de pédalage imposée inférieure de 15% à la FPP. Ensuite, les sujets effectueront une période de repos de 8 min. Puis, ils feront un nouvel exercice de 5 minutes à la puissance correspondant au SV1 ; fréquence de pédalage imposée inférieure de 25% à la FPP.

### 3) Déroulement de la recherche

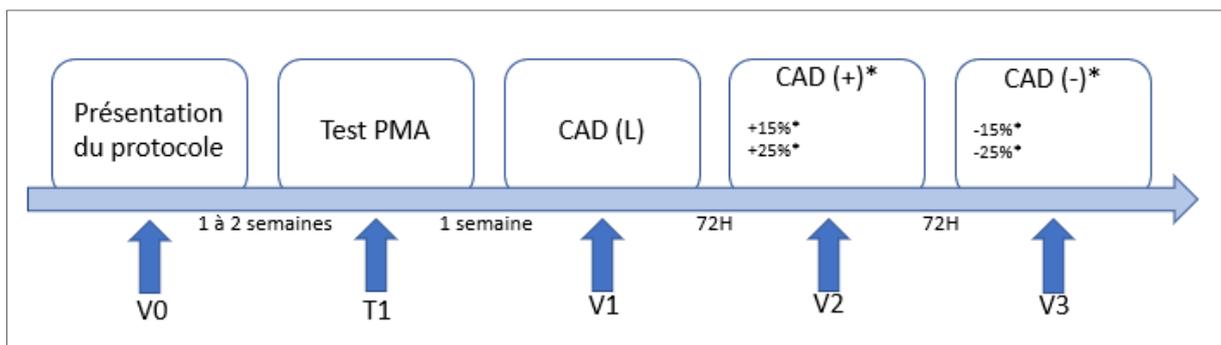


Figure 14 : Déroulement de l'étude schématisé. La flèche en bleu claire représente la chronologie de l'étude et les flèches foncées indiquent les événements correspondants aux différentes visites.\*Randomisation aléatoire sur l'ordre de passage entre augmentation ou diminution de la cadence. Et entre variation de la cadence dans l'augmentation ou la diminution de celle-ci.

#### a) Pré-tests :

T1 : Test PMA : Départ 20W, puis incrément de 10W toutes les 2 minutes.

V1 : Echauffement de 3 min à 50% de la puissance obtenue à SV1, suivi d'un exercice de 5 minutes à la puissance correspondant au SV1 et à la FPP.

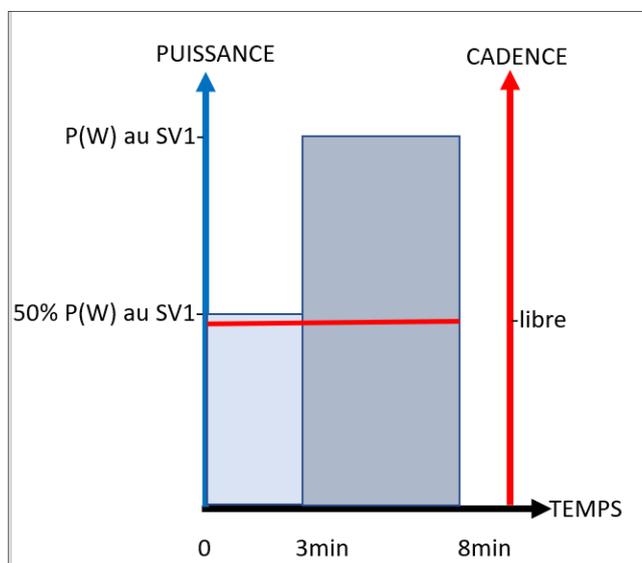


Figure 15 : Représentation graphique de l'évolution de la puissance et de la cadence en fonction du temps pour la visite V1 CAD (L).

## b) Tests

Début de chaque test : Echauffement de 3 min à 50% de la puissance obtenue au SV1.

### V2 CAD (+) :

Exercice de 5 minutes à la puissance correspondant au SV1 ; fréquence de pédalage imposée supérieure de 15% à la moyenne de fréquence de pédalage à V2.

Repos de 8 min.

Exercice de 5 minutes à la puissance correspondant au SV1 ; fréquence de pédalage imposée supérieure de 25% à la moyenne de fréquence de pédalage à V2.

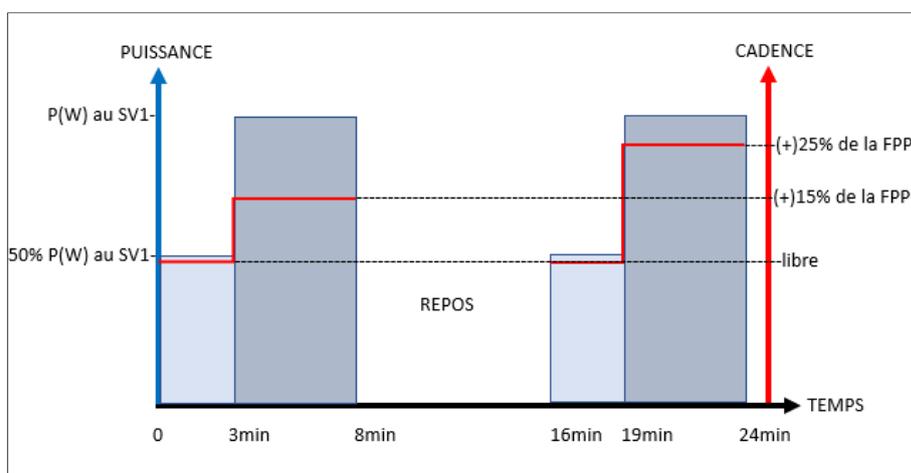


Figure 16 : Représentation graphique de l'évolution de la puissance et de la cadence en fonction du temps et de l'enchaînement du protocole pour la visite V2 CAD (+).

### V3 CAD (-) :

Exercice de 5 minutes à la puissance correspondant au SV1 ; fréquence de pédalage imposée inférieure de 15% à la moyenne de fréquence de pédalage à V2.

Repos de 8 min.

Exercice de 5 minutes à la puissance correspondant au SV1 ; fréquence de pédalage imposée inférieure de 25% à la moyenne de fréquence de pédalage à V2.

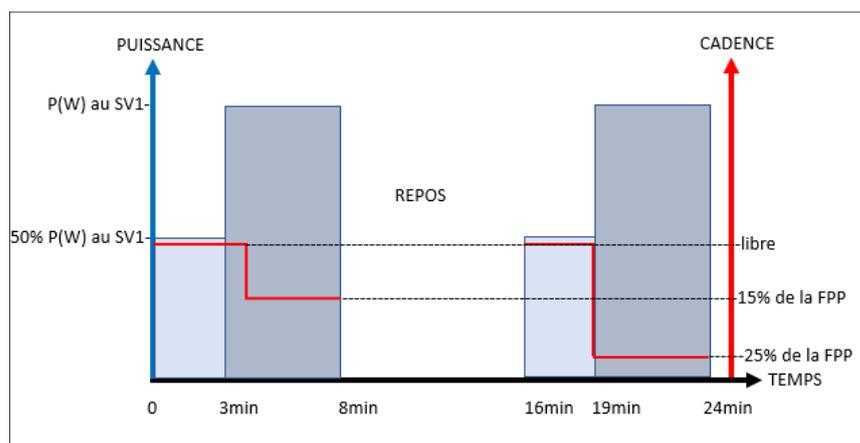


Figure 17 : Représentation graphique de l'évolution de la puissance et de la cadence en fonction du temps et de l'enchaînement du protocole pour la visite V3 CAD (-).

### c) Temps prévisionnel nécessaire

T1 : 35 min = durée du test PMA < 20 min + installation et appareillage du patient 15 min.

V1 : durée du test 20 min = 8 min + installation et appareillage du patient 12 min.

V2 : durée du test 40 min = 24 min + installation et appareillage du patient 16 min

V3 : cf. V2.

### d) Calendrier des évaluations et des visites

Tableau I : Calendrier prévisionnel des évaluations à réaliser aux différentes visites pour le protocole.

Evaluations	T1	V1	V2	V3
PMA Et Spiro		CAD (L)	CAD (+)	CAD (-)
Informations volontaires	x			
Examen anthropométrique et classification BPCO GOLD	x			
Relevé des éventuels évènements indésirables	x	x	x	x

Relevé des éventuels évènements indésirables graves	x	x	x	x
Relevé des éventuels traitements concomitants	x	x	x	x
Mesure FC, SPO <sub>2</sub> (doigt ou oreille)	x	x	x	x
Mesure de la PMA et spirométrie	x			
Mesure paramètres d'échanges gazeux	x	x	x	x
EVA : DYSPNEE	x	x	x	x
Température et hygrométrie		x	x	x

#### 4) Evaluations

Quant à la spirométrie, la capacité vitale forcée (CVF) et le volume expiré maximal pendant la première seconde (VEMS) seront mesurés lors d'une boucle débit-volume. L'ensemble des valeurs numériques obtenues au cours de l'exploration fonctionnelle respiratoire sera comparé aux valeurs théoriques de l'ERS (European Respiratory Society).

Au minimum, deux mesures seront faites pour chaque sujet et les meilleures valeurs seront retenues. Les valeurs théoriques seront celles de l'ERS (European Respiratory Society) modifiées en 1993.

L'évaluation de la PMA sera réalisée à partir d'un protocole « triangulaire » jusqu'à épuisement du sujet. L'intensité de l'exercice augmentera régulièrement par palier de 10 watts toutes les deux minutes avec un départ à 20W.

L'augmentation progressive de la puissance débutera à un niveau suffisamment faible pour autoriser un échauffement et pour permettre au métabolisme aérobie de se mettre en route avec progressivité. Les paliers successifs d'augmentation de la puissance seront progressifs et d'une durée optimale pour éviter des accroissements excessifs de lactate au niveau musculaire. Nous éviterons également une incrémentation trop brutale, afin d'avoir une bonne régulation de l'effort.

Les critères d'atteintes seront :

- Le niveau de la puissance mécanique à partir duquel la V'O<sub>2</sub> n'augmente plus et commence à plafonner ;

- CR10 de l'échelle de Borg = 10 ;
- FCMT atteinte (FCMT = 220- âge) ;
- Epuisement ;
- Stagnation  $V'O_2$  malgré  $\uparrow$  intensité exercice ;
- $QR > 1,1$  ( $QR = VCO_2/VO_2$ ) ;
- Lactatémie > 8 mmol/l.

La méthode utilisée pour déterminer le SV1 sera basée sur la cinétique des paramètres ventilatoires (Cf. I.1.d. Notion de seuil ventilatoire, épreuve d'effort et d'exercice).

Toutes les expérimentations seront réalisées sur un ergocycle avec frein électromagnétique capable d'ajuster de manière automatique et instantanément la charge en fonction de la fréquence de pédalage (Ergocycle Medic E465, Médic-Eval, Saint Ismier, France). La selle et le guidon seront ajustés aux données anthropométriques des sujets.

Tout au long des exercices CAD (L), CAD (+) et CAD (-), la fréquence cardiaque battement à battement sera mesurée à l'aide d'une ceinture thoracique Polar H7 (Polar Electro Oy, Kempele, Finlande).

Les échanges gazeux ainsi que les paramètres ventilatoires cycle à cycle seront collectés par un système de mesure Metalyzer 3B-R3 (Cortex Biophysik GmbH, Leipzig, Germany). L'étalonnage des gaz ainsi que celui du capteur de débit seront réalisés avant chaque utilisation comme préconisé par le fabricant.

#### 5) Déviations du protocole

Les points suivants seront considérés comme des déviations au protocole :

- Consommation de tabac pendant l'étude ;
- Modifications significatives des habitudes d'activités physiques et sportives ;
- Excès dans les deux jours précédant les visites (alimentation, alcool, sport) ;
- Consommation de produits ou traitements interdits (cf. critères de non-inclusion).

Cette liste n'est pas exhaustive. Si les investigateurs estiment qu'un volontaire présente une déviation autre, il doit avertir le promoteur et l'investigateur principal.

En cas d'inclusion à tort ou de violation des consignes et du protocole de la part du volontaire (déviation), les décisions pourront être les suivantes :

- Sortie prématurée ;
- Poursuite de l'étude dans les conditions normales.

Cette décision se fera au cas par cas en concertation avec le promoteur et les investigateurs. Ces décisions devront être prises en tenant en compte la sécurité du volontaire, le biais entraîné pour l'étude et le respect du principe de l'ITT.

#### 6) Durée de la recherche

Chronologie et durée des étapes de la recherche :

1 à 2 semaines pourront séparer les visites V0 et T1. Ensuite, V1 aura lieu 1 à 2 semaines après T1. Les visites V1, V2, V3 seront séparées au moins de 72h et au plus d'une semaine. Aucune tolérance ne sera acceptée concernant ces délais.

#### 7) Durée prévue de participation à la recherche

La participation d'un volontaire à cette étude n'excédera pas un mois.

#### 8) Sortie d'étude d'un participant à la recherche

Sortie prématurée :

Elle correspond à un arrêt prématuré de la recherche pour le sujet inclus.

Les raisons pour lesquelles la participation d'un sujet peut être prématurément terminée sont les suivantes :

- Retrait de consentement du volontaire quelle qu'en soit la raison ;
- Perdu de vue ;
- Evénements ou effets indésirables influant sur la sécurité du volontaire selon l'investigateur principal ;
- Les volontaires sortis prématurément de l'étude ne feront pas l'objet de surveillance particulière compte tenu de l'absence de risque notable liée à la recherche. Néanmoins, toutes les mesures nécessaires seront mises en œuvre afin de gérer les perdus de vue ;

Les sorties prématurées d'étude ne seront pas remplacées.

#### 9) Définition d'une fin d'étude

La fin d'étude correspond à la date de la dernière visite du dernier volontaire participant à l'étude.

#### 10) Fin d'étude prématurée

L'investigateur principal peut décider d'arrêter prématurément l'étude à tout moment pour l'une des raisons suivantes :

- Recrutement insuffisant ;
- Déviations aux bonnes pratiques cliniques et/ou autorités de tutelles.

De surcroît, les autorités compétentes peuvent décider de suspendre ou interdire l'étude si elles considèrent que les conditions d'autorisation ne sont pas respectées ou ont des doutes sur la validité scientifique du projet.

#### 11) Participants à la recherche

##### a) Population à étudier

12 patients ayant une BPCO sévère du centre de réadaptation. Stade : Gold stade 3-4.

Critères d'inclusion :

- Sujet masculin et/ou féminin ; Age : 40 à 80 ans (bornes incluses) ;
- GOLD = [3;4] ;
- Sujet ayant un IMC compris entre 18,5 kg/m<sup>2</sup> et 26 kg/m<sup>2</sup> (bornes incluses) ;
- Sujet non-fumeur / ou sevré ;
- Sujet ayant un poids stable depuis au moins un mois avant le début de l'étude ;
- Sujet ayant des habitudes alimentaires stables depuis au moins un mois avant le début de l'étude et acceptant de conserver ses habitudes alimentaires pendant l'étude ;

- Sujet capable et désireux de se conformer au protocole et acceptant de donner son consentement éclairé par écrit ;
- Sujet affilié à un régime de sécurité sociale ;
- Sujet acceptant d'être inscrit au fichier national des volontaires qui se prêtent à des recherches biomédicales.

Critères de non-inclusion :

- Pa systolique  $\geq$  à 15mmhg ; Pa systolique- Pa diastolique  $\leq$ 40mmhg ;
- Cardiopathie obstructive sévère ;
- Rétrécissement valvulaire aortique serré ;
- Troubles du rythme ou conductifs cardiaques sévères évolutifs non appareillés et dépistés lors du test d'effort initial ;
- Thrombus intra-cavitaire cardiaque ;
- Hypertension artérielle pulmonaire sévère (HTAP systolique  $>$ 70mmHg) ;
- Antécédents trombo-emboliques veineux récents (3 derniers mois) ;
- Affection médicale associée pouvant altérer de façon prédominante les capacités fonctionnelles (exemples : troubles métaboliques non stabilisés tels qu'une insuffisance rénale évolutive ; asthénie importante liée à des affections sévères non stabilisées telles qu'une néoplasie, une maladie systémique...) ;
- Incompétences physiques des membres inférieurs gênant le réentraînement à l'effort, qu'elles soient d'origine neurologique (centrale ou périphérique), d'origine artérielle (en particulier, artériopathie des membres inférieurs avec index systolique  $<$  0.6) ou orthopédique (rhumatismes dégénératifs ou inflammatoires) ;
- Patient ayant participé (dans un délai de moins de six mois) ou participant à un programme de réadaptation ;
- Sujet ayant été blessé dans les trois mois qui précèdent le début de l'étude ;
- Sujet ayant des habitudes alimentaires extrêmes ;
- Sujet consommant plus de deux verres d'alcool par jour (tous les jours) ;
- Sujet participant à une autre étude clinique ou en période d'exclusion d'une précédente étude clinique ;
- Sujet ayant perçu un montant total d'indemnités supérieur à 4500 euros depuis le début de l'année civile ;

- Sujet ayant une incapacité linguistique ou psychique de signer le consentement éclairé ;
- Sujet refusant de donner son consentement par écrit ;
- Sujet privé de liberté par décision administrative ou judiciaire, sous tutelle ou curatelle ;
- Sujet impossible à contacter par téléphone en cas d'urgence.

## 12) Modalités de recrutement

Le recrutement des sujets se fera via le CRCP et ciblera les patients venant en rééducation sur le centre.

## 13) Evaluation de la sécurité

### a) Sécurité de la recherche

Les paramètres de sécurité seront :

- Le relevé des effets indésirables tout au long de la recherche ;
- La surveillance des paramètres physiologiques durant l'exercice ;
- La surveillance des faits nouveaux.

## **IV) Analyse statistique et présentation des résultats**

### 1) Plan statistique

L'analyse statistique sera réalisée par VARENNE Nicolas, étudiant en quatrième année de kinésithérapie à l'ISTR Université Lyon 1, encadré et supervisé par Mr BILLET Didier, MK D.E spécialisé en kiné respiratoire et master en recherche clinique et épidémiologie, enseignant à l'ISTR Université Lyon 1 et coordonnateur du diplôme universitaire de kinésithérapie respiratoire et cardio-vasculaire à l'ISTR Lyon 1. Le traitement statistique sera effectué à l'aide du logiciel SPSS.

### 2) Définition de la population à analyser

Il s'agit de l'ensemble des sujets inclus ayant terminé ou non l'étude.

### 3) Description de l'échantillon étudié

La description des sujets à la visite d'inclusion sera réalisée par la statistique descriptive des caractéristiques du sujet disponibles (âge, sexe, type, taille, poids, IMC, composition corporelle, indice de BODE, fréquence de pédalage préférentielle (FPP), puissance maximale aérobie (PMA), puissance au SV1). Les critères biologiques, de même que l'ensemble des autres paramètres mesurés à chaque visite feront l'objet de statistiques descriptives.

### 4) Seuil de signification statistique

Le seuil de 5% sera utilisé pour toutes les analyses.

### 5) Analyse des résultats

Une ANOVA (Sujets12XTempsXCadence) va être effectuée avec comme variables indépendantes :

- Variation de la cadence avec trois modalités : CAD (L), CAD (+) et CAD (-)
- Temps avec deux modalités : P1 et P2

P1 correspondant à l'intervalle de temps [0 ; 2min30s], et P2 correspondant à l'intervalle de temps ]2min30s ; 5],

Les variables dépendantes étudiées seront :  $VO_2$ , VE, VT, FR, FC, et, Pa,  $SaO_2$ .

Plusieurs résultats seront ensuite analysés :

Premièrement, il s'agira d'une comparaison des variables dépendantes entre les périodes P1 et P2 pour chaque condition : CAD (L), CAD (+) et CAD (-).

Dans un second temps, d'une comparaison de ces variables entre les différentes conditions : CAD (L), CAD (+) et CAD (-) pour le temps total d'exercice.

### 6) Méthode de prise en compte des données manquantes, inutilisées et non valides

Aucune imputation des valeurs manquantes n'est prévue.

## 7) Gestion des modifications apportées au plan d'analyse de la stratégie initiale

Le plan d'analyse statistique sera dirigé à l'aveugle des données. Si des modifications doivent être apportées dans les méthodes décrites ci-dessus, elles seront validées par le statisticien de référence.

## 8) Choix des personnes à inclure dans les analyses

Il s'agit de l'ensemble des sujets inclus ayant terminé ou non l'étude.

# V) Considérations éthiques

## 1) Conduite éthique de l'étude

Cette étude sera réalisée chez des sujets volontaires en appliquant des règles de bonnes pratiques cliniques. L'étude se déroulera également en conformité avec le code de Sante Publique.

## 2) Information et consentement

Lors de la première visite (V0) au sein du centre d'expérimentation, des informations orales et écrites concernant la recherche seront fournies aux volontaires. Il s'agit notamment de la lettre d'information précisant l'objectif, la méthodologie, la durée, les contraintes et les bénéfices de cette recherche. Le sujet pourra poser toutes les questions qui lui semblent utiles aux investigateurs. Il bénéficiera ensuite d'un temps de réflexion qui lui semblera nécessaire, avant de signer le consentement éclairé, s'il est d'accord pour participer à la recherche. Lors de la visite T1, les investigateurs réitéreront la présentation du protocole de l'étude, la présentation des outils, des locaux et du personnel.

Le sujet pourra retirer son consentement à tout moment, sans avoir à justifier son acte et sans conséquences sur la qualité des soins dont il fera l'objet. Le consentement ne décharge pas l'investigateur de ses responsabilités à l'égard du participant à la recherche.

### 3) Lieux de la recherche

L'étude se déroule dans les locaux du CRCP des Hauts de Chazal, 9 Chemin des Quatre Journaux, 25770 Besançon-Francois.

### 4) Confidentialité des données

Afin de protéger les données et les sujets recrutés, les seules clés d'identification seront le numéro séquentiel attribué au volontaire lors de la visite de sélection, le numéro qui lui aura été attribué en seconde intention, (s'il satisfait aux critères d'inclusion).

Les données seront traitées de manière confidentielle grâce à ce codage et en aucun cas il ne sera possible aux personnes extérieures à l'expérimentation de connaître ou de deviner l'identité du sujet.

Les investigateurs conserveront pour leur usage une liste associant les identités, les adresses et les numéros de téléphone des sujets aux initiales sous lesquelles ils apparaissent sur le cahier d'observation.

### 5) Evaluation de la balance bénéfique / risque

La réalisation du protocole (tests physiques et exercice sur ergomètre) n'expose pas les sujets à un risque particulier. Lors des différentes visites, la surveillance médicale sera constante. Les tests réalisés et l'exercice sous-maximal sur ergomètre représentent des efforts couramment réalisés par les sujets lors de leur rééducation. En ce qui concerne les bénéfiques, les sujets qui participeront à cette étude pourront, s'ils le souhaitent, connaître leurs résultats aux tests physiques, ce qui leur permettra d'une part, de mieux comprendre les impacts physiologiques lors d'un exercice, et, d'autre part, de prendre conscience de l'impact que peut avoir un paramètre mécanique sur leur physiologie.

## VI) Procédure administrative

### 1) Amendement au protocole

Ni les investigateurs ni le promoteur ne peuvent modifier le protocole sans l'autorisation de l'autre partie.

Tout changement au protocole doit faire l'objet d'un amendement qui doit être daté et signé par les deux parties et doit apparaître comme amendement au protocole.

Les amendements substantiels sont soumis pour approbation au comité d'éthique et aux autorités compétentes.

## 2) Gestion des données

### a) Recueil des données

L'ensemble des données relatives à cette recherche biomédicale seront recueillies dans un Dossier Source Volontaire (DSV) prévu à cet effet. Il existe un dossier source volontaire pour chaque sujet pré-inclus dans le protocole.

Les données sources sont l'ensemble des informations figurant dans les documents originaux ou dans les copies identifiées de ces documents.

### b) Saisie et gestion des données

Les données seront saisies par les investigateurs ou par le personnel habilité par les investigateurs dans un CRF sous la responsabilité de Mr VARENNE Nicolas.

Les données erronées ou manquantes feront l'objet de demandes de corrections.

La base de données sera gelée après que toutes les demandes de corrections auront été résolues par l'ensemble des investigateurs.

## 3) Conservation des données et des documents relatifs à la recherche

Les investigateurs doivent conserver les documents liés à l'étude pendant 15 ans après l'interruption ou la fin de l'étude. Les dossiers des sujets ainsi que les autres documents sources doivent être gardés aussi longtemps que l'autorise l'institution, mais pas moins de 15 ans.

Seront archivés par le CRCP des Haut de Chazal pendant au moins 15 ans après la fin de l'étude : le protocole, les données sources ainsi que les CRF, les demandes de correction, les consentements des sujet, les copies des approbations du CPP et

d'autres autorités, les correspondances relatives à l'essai et tout autre document pertinent relatif à l'étude.

Tout changement de propriété de ces données devra être mentionné. Un exemplaire original du rapport sera également conservé par le promoteur.

Toutes les données et tous les documents devront être mis à la disposition des autorités compétentes si elles en font la demande.

#### 4) Droit d'accès

Les données concernant les sujets recueillies lors de cette recherche resteront strictement confidentielles. Elles ne seront consultables que par les investigateurs, les personnes mandatées par le promoteur et astreintes au secret professionnel et éventuellement un représentant des autorités de santé. Ces personnes prennent toutes les précautions nécessaires, afin d'assurer la confidentialité des informations relatives aux essais, aux personnes qui s'y prêtent, notamment en ce qui concerne leur identité ainsi que les résultats obtenus.

Le traitement des données relatives à la présente recherche clinique est conforme aux dispositions de la loi n°2004-801 du 06 août 2004 relative à la protection des personnes physiques à l'égard des traitements des données à caractère personnel et modifiant la loi n°78-17 du 06 janvier 1978 relative à l'informatique, aux fichiers et aux libertés.

#### 5) Contrôle et assurance de la qualité

##### a) Considérations générales

Cette recherche biomédicale sera conduite conformément aux bonnes pratiques cliniques.

##### b) Monitoring

Conformément aux bonnes pratiques cliniques, les données feront l'objet d'un contrôle (monitoring) en cours d'étude sur le site d'investigation par un membre du personnel du CRCP extérieur à l'étude.

Pendant toute la durée de l'étude, la personne sera présente sur le site d'investigation et vérifiera l'application correcte du protocole, la conformité des données entrées dans le CRF avec les documents sources et s'assurera de son remplissage correct, du reporting des événements indésirables et du stockage correct des dossiers sources et des documents relatifs à l'étude.

#### c) Audit

Le promoteur est responsable de s'assurer que ses représentants et les investigateurs remplissent les conditions comme indiquées par les BPC. Toute la documentation d'étude doit être directement accessible aux auditeurs.

Les conditions pratiques pour l'audit sont discutées entre les investigateurs et le département d'assurance de qualité clinique.

Des informations orales sur les résultats d'audit sont fournies aux investigateurs.

#### d) Inspection

Une autorité de tutelle peut également décider de faire une inspection (pendant l'étude ou une fois celle-ci achevée). L'investigateur devra permettre l'accès direct aux documents source.

#### e) Règles relatives à la publication

A la fin de l'étude, un rapport sera rédigé par le CRCP sous la responsabilité de l'investigateur principal. Il sera signé par l'investigateur principal et le premier investigateur associé.

Ce rapport inclura les objectifs, la méthodologie, les résultats et la conclusion de l'étude. Tous les sujets inclus figureront dans le rapport final.

L'ensemble des traitements concomitants suivis par les volontaires pendant la période expérimentale, ainsi que les éventuels événements indésirables (EI) et les événements indésirables graves (EIG) seront présentés sous forme de tableau récapitulatif.

Tous les résultats de cette étude incluant les données, les conclusions et les découvertes résultant de l'étude sont la propriété du promoteur et du CRCP.

Il est convenu que la publication des résultats de l'étude n'est autorisée que dans le cadre d'une ou plusieurs publications présentant les résultats obtenus une fois l'étude finalisée et complétée.

La liste des auteurs devra être acceptée par tous les investigateurs préalablement à la publication.

## VII) Etude préliminaire :

### 1) Objectifs de l'étude préliminaire

- Adapter le protocole pour faciliter l'étude finale ;
- Choisir la meilleur incrémentation possible et adaptée pour le test à l'exercice ;
- Ajuster les plages d'augmentation et de diminution de la cadence ;
- Observer l'évolution des paramètres ventilatoires et d'échanges gazeux en fonction de ce protocole ;
- Observer l'effet de la cadence sur la FC et la  $V'O_2$  ;
- Observer s'il existe des différences au SV1 dans le choix libre de la cadence entre le l'exercice progressif (Test PMA) et l'exercice continu (Test cad libre) ;
- Dégager les implications et recommandations pour la prise en charge de ces patients.

### 2) Déroulement de la pré-étude

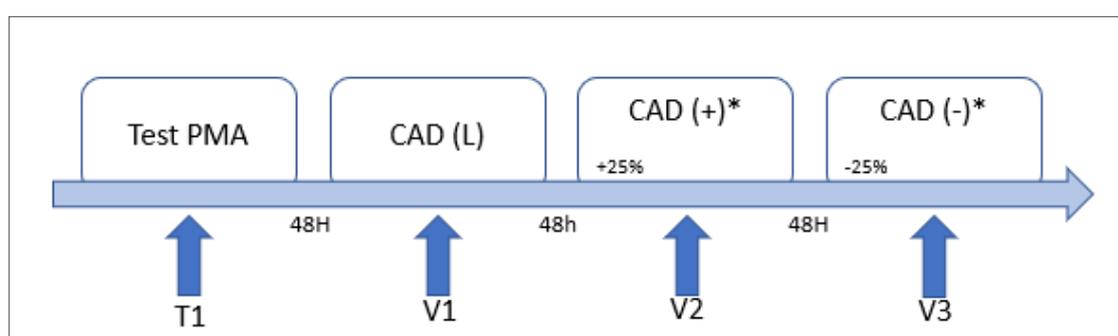


Figure 18 : Déroulement de l'étude préliminaire schématisé. La flèche en bleu claire représente la chronologie de l'étude et les flèches foncées indiquent les événements correspondants aux différentes visites. \*Randomisation aléatoire sur l'ordre de passage entre augmentation ou diminution de la cadence.

#### a) Pré-tests

T1 :

Spirométrie et test PMA : Départ 20W, puis incrément de 10W toutes les 2 minutes.

### V1 :

Echauffement de 3 min à 50% de la puissance obtenue au SV1 suivi d'un exercice de 5 minutes à la puissance correspondant au SV1 et à la FPP (Figure 15).

### b) Tests

Début de chaque test : Echauffement de 3 min à 50% de la puissance obtenue à SV1.

### V2 CAD (+) :

Exercice de 5 minutes à la puissance correspondant au SV1 ; fréquence de pédalage imposée supérieure de 25% à la moyenne de fréquence de pédalage à V1.

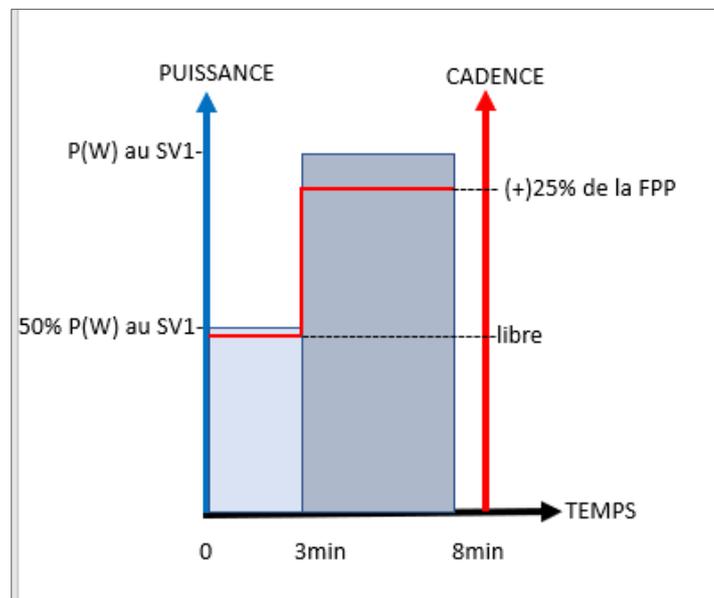


Figure 19 : Représentation graphique de l'évolution de la puissance et de la cadence en fonction du temps pour la visite CAD (+) de l'étude préliminaire.

### V3 CAD (-) :

Exercice de 5 minutes à la puissance correspondant au SV1 ; fréquence de pédalage imposée inférieure de 25% à la moyenne de fréquence de pédalage à V1.

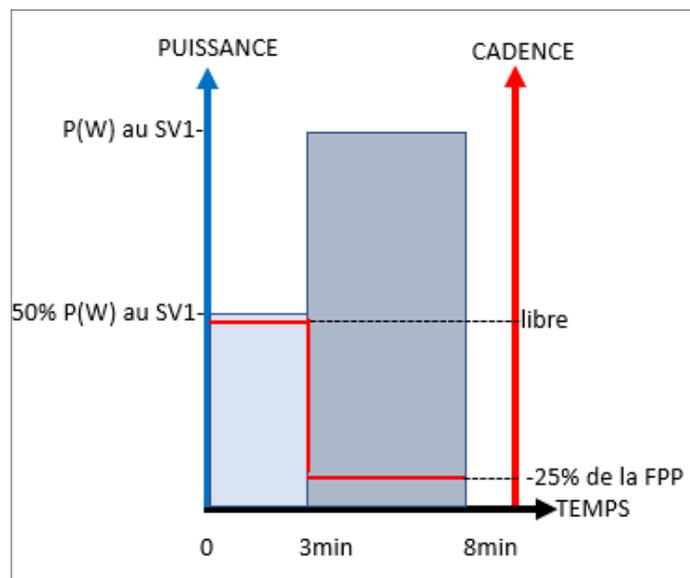


Figure 20 : Représentation graphique de l'évolution de la puissance et de la cadence en fonction du temps pour la visite CAD (-) de l'étude préliminaire.

### 3) Calendrier des évaluations et visites :

Tableau II : calendrier des évaluations réalisées aux différentes visites de l'étude préliminaire.

Evaluations	T1	V1	V2	V3
	PMA	CadL	+VCad	- VCad
Informations volontaires	x			
Examen anthropométrique et classification BPCO GOLD	x			
Relevé des éventuels évènements indésirables	x	x	x	x
Relevé des éventuels évènements indésirables graves	x	x	x	x
Relevé des éventuels traitements concomitants	x	x	x	x
Mesure FC, SpO <sub>2</sub> (doigt ou oreille)	x	x	x	x
Mesure de la PMA	x			

Mesure paramètres d'échanges gazeux et ventilatoire	x	x	x	x
Température et hygrométrie		x	x	x

#### 4) Temps prévisionnel nécessaire

T1 : 45 min = durée du test PMA < 30 min + installation et appareillage du patient 15min

V1 : durée du test 20 min = 8min + installation et appareillage du patient 12min

V2 : durée du test 20 min = 8 min + installation et appareillage du patient 12 min

V3 : cf. V2

#### 5) Exemple de planning

Lundi (T1) : Passage patients 1 et 2 sur le test à l'exercice (médecin, infirmière, investigateurs) ; temps par patient : 45min.

Mercredi (V1) : Passage patients 1 et 2 au test de fréquence de pédalage autonome (un professionnel de santé et investigateur principal) ; temps par patient : 20 min.

Vendredi (V2) : passage patient 1 et 2 sur une condition (augmentation ou diminution de fréquence) (un professionnel de santé et investigateur principal) ; temps par patient : 20 min.

Lundi (V3) : passage patient 1 et 2 sur l'autre condition (augmentation ou diminution de fréquence) (un professionnel de santé et investigateur principal) ; temps par patient : 35 min.

## 6) Résumé de l'étude préliminaire

**Introduction.** Cette étude a pour objectif d'évaluer les effets de la cadence de pédalage au cours d'un effort sous-maximal à puissance constante au seuil ventilatoire (SV1) sur les échanges gazeux et la mécanique respiratoire dans la BPCO sévère.

**Matériels et méthodes.** Deux sujets atteints de BPCO sévère ont effectué au SV1 trois exercices rectangulaires sur ergocycle à trois cadences différentes (cadence libre CAD (L), +25% de cadence libre CAD (+), -25% de cadence libre CAD (-)). L'analyse des échanges gazeux et les débits ont été collectés via Métalyser 3B-R3. Etant donnée la taille de l'échantillon, l'analyse statistique MBI « Magnitude Base Interferences » a été réalisée (William G. Hopkins, Marshall, Batterham, & Hanin, 2009).

**Résultats.** La cadence préférentielle utilisée par les sujets a été de  $34 \pm 8$  RPM (moyenne  $\pm$ SD). Le pédalage en CAD (+) a eu un petit effet par rapport au pédalage en CAD (L) sur l'augmentation de la  $V'O_2$  chez les deux sujets ( $+9 \pm 0.02\%$  (moyen  $\pm$  SD)), traduisant une augmentation du coût énergétique en situation sous-maximale. Seul le sujet 2 est arrivé à terminer un des exercices en CAD (+). Le temps de maintien le plus long pour le sujet 1 a été pendant CAD (L) ( $t = 4\text{min}2\text{s}$ ). Dans les deux cas, le volume courant (VT) a été le plus élevé et la fréquence respiratoire (FR) la plus basse de toutes les mesures (sujet 1 : CAD (L) VT =  $0.92 \pm 0.08$  l (moyen  $\pm$  SD) et FR =  $27 \pm 2.79$  cycles/min ; sujet 2 : CAD (+) VT =  $1.83 \pm 0.18$  l et FR =  $22 \pm 2.23$  cycles/min).

**Conclusion.** Dans notre étude les fréquences de pédalage préférentielles des sujets BPCO sont loin des fréquences de 60 tours/min qui leur sont souvent proposées en centre de rééducation. La fréquence de pédalage à puissance constante semble avoir un effet sur la ventilation du BPCO. L'augmentation de la ventilation minute (V'E) par le VT pourrait alors être en cause dans le maintien ou non de l'exercice et pourrait être un facteur limitant respiratoire durant l'exercice chez le BPCO. Bien que la modulation de la cadence puisse améliorer le V'E par augmentation du VT, il se peut que l'individu ne puisse réussir l'épreuve imposée. Car même en améliorant la fonction respiratoire l'on peut retrouver chez ses individus d'autres facteurs limitants l'exercice, comme une faible capacité musculaire ou des pathologies associés.

Mots clés : BPCO, cadence de pédalage, exercice modérée, fréquence respiratoire, kinésithérapie respiratoire, rééducation, réhabilitation, réponse cardio-ventilatoire, seuil ventilatoire, ventilation.

## 7) Abstract of pilot study

**Introduction.** This study aims to assess ventilation changes in during sub-maximal exercise at the same power output and anaerobic threshold but at three different pedal cadences in severe COPD.

**Methods.** Two severe BPCO subjects performed constant work rate cycle exercises at three different rates (freely chosen cadence CAD (L), +25% (CAD (+)) and -25% (CAD (-)) of freely chosen cadence). Gas exchange analyse and flow were collected with a Métalyser 3B-R3. Considering the size of the sample, the MBI "Magnitude Base Interferences" statistical analysis was performed (William G. Hopkins, Marshall, Batterham, & Hanin, 2009).

**Results.** The preferential pedaling frequency used by the subjects was  $34 \pm 8$  RPM (mean  $\pm$ SD). Pedaling in CAD (+) has a small effect on  $VO_2$  increase for the both subjects compare in CAD (L), reflecting an increase in energy cost ( $+9 \pm 0.02\%$  (mean  $\pm$  SD)) in a sub-maximal exercise. Only subject 2 managed to finish one of the exercises in CAD (+). The best performance of subject 1 was reach during CAD (L) ( $t=4min2s$ ). In both cases the tidal volume (VT) was the highest and the respiratory rate (FR) the lowest of all test results. (subject 1 : CAD (L) VT =  $0.92 \pm 0.08$  l (mean  $\pm$ SD) and FR =  $27 \pm 2.79$  RPM ; subject 2 : CAD (+) VT =  $1.83 \pm 0.18$  l and FR =  $22 \pm 2.23$  RPM).

**Conclusion.** In our study, the preferential pedaling frequencies of the COPD subjects are far from the 60 rpm frequencies which are often asked to them in the rehabilitation center. Changing the pedaling rate at constant power output appears to affect the ventilation of COPD. The ventilation increase ( $V'E$ ) by the VT could be involved in the maintenance or not of exercise and may be a limiting respiratory factor during exercise in COPD. Although cadence modulation can improve  $V'E$  by increasing the VT, the individual may not be able to complete the imposed test. Even if respiratory function can be improved for some individuals, we can find other exercise limiting factors, such as a weak muscular capacity or associated pathologies.

Keywords : anaerobic threshold, COPD, moderate exercise, pedal cadence, physiotherapy, pulmonary disease, respiratory frequency,, rehabilitation, ventilation.

## 8) Etude préliminaire : Travaux non publiés

### **Travaux non publiés**

Etude préliminaire : **Quels sont les effets de la variation de la cadence de pédalage au cours d'un effort sous-maximal au seuil ventilatoire à puissance constante sur les échanges gazeux et la mécanique respiratoire dans la BPCO ?**

Nicolas Varenne<sup>1\*</sup>, Johan Cassirame<sup>2,3</sup>, Odile Flez<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Institut des Sciences et Techniques de Réadaptation, Université Lyon 1, Rhône-Alpes Auvergne, Lyon, France.

<sup>2</sup>Laboratoire Culture, Sport, Santé et Société, Plateforme EPSI, Université Bourgogne-Franche Comté, EA 4660, Besançon, France

<sup>3</sup>EA 7507, Laboratoire Performance, Santé, Métrologie, Société. Reims, France

<sup>4</sup>CRCP des Hauts de Chazal, Bourgogne Franche-Comté, Besançon François, France

\*Correspondant : nicolas.varenne@etu.univ-lyon1.fr

### **Introduction :**

Dans la littérature actuelle, la notion de patients non-répondeurs laisse place à un questionnement sur l'adaptation individualisée des programmes proposés et cela notamment en termes de préférence motrice. Cette préférence motrice sur ergocycle est proche de la cadence optimale énergétique chez le sujet sain pour un exercice continu d'intensité faible à modérée (Brisswalter et al., 2000 ; Takaishi et al., 1996). Le réentraînement mis en place dans le cadre de la réhabilitation respiratoire des patients porteurs d'une BPCO repose majoritairement sur l'exercice en endurance. Son objectif est de permettre aux patients d'effectuer davantage de tâches dans leur vie quotidienne et de sortir du « cercle vicieux du déconditionnement » (Porszasz et al., 2005 ; Puente-Maestu et al., 2000 ; Sala et al., 1999). Il est réalisé généralement sur cycloergomètre en raison de la garantie de la sécurité du patient (faible risque de chute) et de la facilité de contrôle par le thérapeute (Bergman et al., 2014).

Les différents textes de la HAS sur les recommandations des bonnes pratiques sur la rééducation ne donnent aucune indication sur l'utilisation du paramètre de la fréquence de pédalage. Dans les recommandations sur les épreuves d'effort et d'exercice des

différentes sociétés savantes (cardiologie, pneumologie, médecine du sport), l'on ne retrouve soit aucune indication sur les deux composantes de la puissance mécanique soit des recommandations de pédalage entre 60 et 70 RPM (Marcadet et al., 2018 ; Marthan, 2003 ; Pavy et al., 2011 ; Richard & Costes, 2018 ; Sellier et al., 1997). Il serait possible, cependant, que cela ne corresponde pas à la préférence motrice du patient et/ou biaise la performance du patient et ainsi la reproductibilité d'un praticien à un autre.

La notion de cadence est donc souvent oubliée lors de l'utilisation de la puissance mécanique et cela tant au niveau du diagnostic qu'à celui de la réhabilitation. Cependant, il est important de la prendre en compte dans l'analyse et de la contrôler dans l'effort, car elle donne lieu à des réponses physiologiques différentes (Brisswalter et al., 2000 ; Foss & Hallén, 2004 ; Takaishi et al., 1996 ; Vercruyssen et al., 2009 ; Houssem Zorgati et al., 2015).

Cela pourrait expliquer que plus d'un tiers des patients porteurs d'une BPCO sévère qui réalisent une procédure de réhabilitation respiratoire incluant un réentraînement à l'effort ne bénéficient pas d'améliorations significatives en termes de capacités fonctionnelles et de qualité de vie (Garrod, Marshall, Barley, & Jones, 2006 ; T. Troosters et al., 2001).

Il n'existe à notre connaissance aucune étude sérieuse qui s'est intéressée à la relation entre fréquence respiratoire, fréquence de pédalage et rééducation chez le BPCO. Les résultats chez le sujet sain nous permettent de nous questionner sur les protocoles actuellement utilisés et leur adaptation en fonction de la pathologie et du paramètre fréquence de pédalage. Sachant qu'une étude récente vient de montrer une altération du couplage respiratoire à la marche chez les patient BPCO versus sujets sains (Yentes et al., 2019).

Ces observations questionnent sur le choix des fréquences de pédalage imposées aux patients en pratique courante. Si les fréquences de pédalage se situant aux alentours de 60 RPM sont bien tolérées en réadaptation cardiaque, spécialité pionnière du réentraînement à l'effort chez le patient, elles pourraient être inadaptées chez des patients souffrant de BPCO sévère et présentant une distension dynamique de repos et/ou d'effort.

Il serait donc possible qu'à l'effort sous-maximal, pour une puissance constante, les BPCO puissent générer des réponses différentes de l'organisme, notamment en termes de débit ventilatoire ou ventilation minute ( $V'E$ ), de fréquence respiratoire (FR), de volume courant (VT) et qu'ils puissent avoir une meilleure capacité à l'effort et cela en modulant uniquement la fréquence de pédalage. Durant le pédalage concentrique, un couplage entre la fréquence de pédalage et la FR a été mis en évidence (Kohl et al., 1981). Les fréquences plus hautes au SV1 chez le sujet sain entraînent une augmentation du  $V'E$ , du VT, de la  $V'O_2$  et de la fréquence respiratoire (Brisswalter et al., 2000 ; Lepers et al., 2001 ; Mitchell et al., 2019 ; Takano, 1988 ; H. Zorgati et al., 2013 ; Housseem Zorgati et al., 2015). Cela pourrait augmenter par la même la dyspnée, la fatigue musculaire et l'hyperinflation dynamique chez le sujet BPCO. En variant cette fréquence mécanique notamment vers des cadences préférentielles pour une même puissance, nous pourrions améliorer ou diminuer des paramètres d'échanges gazeux comme la diffusion alvéolo-capillaire, l'hyperinflation dynamique, la fatigue des muscles respiratoires et la dyspnée chez des patients atteints de pathologies respiratoires chroniques.

Il serait donc intéressant d'observer ces réponses ciblées à l'exercice sous-maximal, qui - nous le rappelons - constitue la charge d'entraînement actuellement utilisée chez les BPCO. Il s'agit, dans un premier temps, d'une simple modulation de la fréquence mécanique à puissance constante qui est utilisée habituellement pour leur rééducation. Cela permettra d'en dégager des mécanismes respiratoires, afin d'adapter au mieux notre programme de rééducation au patient.

Dans notre étude nous souhaitons évaluer les effets de la variation de la fréquence mécanique au cours d'un effort sous-maximal au seuil ventilatoire sur les échanges gazeux et la mécanique respiratoire pour une même puissance donnée chez le BPCO.

### **Méthodologie :**

Sujets :

Deux sujets volontaires atteints de BPCO ont participé à l'étude préliminaire après avoir reçu des explications détaillées sur le protocole expérimental qui est en accord avec les principes énoncés dans la déclaration d'Helsinki. Les caractéristiques des sujets sont données dans la table 1 ci-dessous.

Tableau III : Caractéristiques des sujets et cadences adoptées (moyenne  $\pm$ SD). FPP Fréquence de pédalage préférentielle, PMA Puissance maximale aérobie, VO2 max consommation maximale d'O2 par minute

N=2	Age (années)	Poids (kg)	Taille (cm)	IMC	GOLD	VO2 max (ml.kg-1.min-1)	PMA (W)	Puissance SV1 (W)	FPP / CAD (L) (RPM)
				25 $\pm$	3,5 $\pm$		75 $\pm$		
Moy et SD	66 $\pm$ 7	68,4 $\pm$ 7,6	165,5 $\pm$ 10,5	0	0,5	17,5 $\pm$ 2,5	5	45 $\pm$ 5	34 $\pm$ 8

#### Protocole :

Lors de la première visite (T1) chaque sujet a réalisé un test d'exercice incrémenté sur ergocycle jusqu'à épuisement, afin de déterminer la valeur de V'O<sub>2</sub> max et le seuil ventilatoire (SV1). La cadence de pédalage lors du test a été cachée aux sujets qui ont pu choisir la cadence de leur choix lors du test.

La puissance de départ a été de 20 watts (W) suivie par une incrémentation de 10W toutes les minutes jusqu'à ce que le sujet remplisse un des critères suivants : seuil plateau de V'O<sub>2</sub>/Kg, incapacité à maintenir la fréquence de pédalage, épuisement du sujet (musculaire ou respiratoire), trouble cardio respiratoire. Ce test (T1) nous a permis de déterminer graphiquement la puissance au SV1, qui correspond à la rupture de la cinétique V'CO<sub>2</sub>/V'O<sub>2</sub>. La détermination du SV1 a été réalisée par deux expérimentateurs experts dans ce domaine.

A la seconde visite (V1), les sujets ont réalisé un test comprenant un échauffement de 3 min à 50% de la puissance obtenue au SV1, suivi par un exercice continu de 5 min à puissance constante correspondant au SV1 de chacun des sujets. La fréquence de pédalage a été pour cette condition libre pour le sujet (CAD (L)). V1 a permis de déterminer la fréquence de pédalage préférentielle (FPP) de chaque sujet.

Lors de la troisième (V2) et quatrième (V3) épreuve, les sujets ont réalisé le même protocole qu'à V1 mais la fréquence de pédalage leur a été imposée. Pour une des visites les sujets ont dû augmenter de +25% leur fréquence de pédalage par rapport à FPP (CAD (+)) et pour l'autre la diminuer de -25% (CAD (-)). Les deux visites ont fait l'objet d'une distribution aléatoire dans l'ordre de réalisation, réduisant l'effet d'ordre de l'exercice.

#### Matériel :

Toutes les expérimentations ont été réalisées sur un ergocycle avec frein électromagnétique capable d'ajuster de manière automatique et instantanément la charge en fonction de la fréquence de pédalage (Ergocycle Medic E465, Médic-Eval,

Saint Ismier, France). La selle et le guidon ont été ajusté aux données anthropométriques des sujets.

Tout au long des exercices CAD (L), CAD (+) et CAD (-), la fréquence cardiaque battement à battement a été mesurée à l'aide d'une ceinture thoracique Polar H7 (Polar Electro Oy, Kempele, Finlande).

Les échanges gazeux ainsi que les paramètres ventilatoires cycle à cycle ont été collecté par un système de mesure Metalyzer 3B-R3 (Cortex Biophysik GmbH, Leipzig, Germany). L'étalonnage des gaz ainsi que celui du capteur de débit ont été réalisés avant chaque utilisation comme préconisé par le fabricant.

Analyse statistique :

Des analyses ont été effectuées sur la FC, le V'E, le VT, la FR et la V'O<sub>2</sub> en fonction de la cadence de pédalage.

La normalité des différentes distributions a été testée à l'aide d'un test de Lilliefors.

Etant donnée la taille de l'échantillon, l'analyse statistique MBI « Magnitude Base Interferences » sera réalisée (William G. Hopkins et al., 2009) afin d'investiguer les réponses des sujets à la variation de fréquence de pédalage. De récents travaux ont montré les bénéfices de cette méthode au dépend d'analyse classique avec une P value (Buchheit, 2016 ; Will G. Hopkins & Batterham, 2016 ; Sullivan & Feinn, 2012).

**Résultats :**

Résultats sujet 1 :

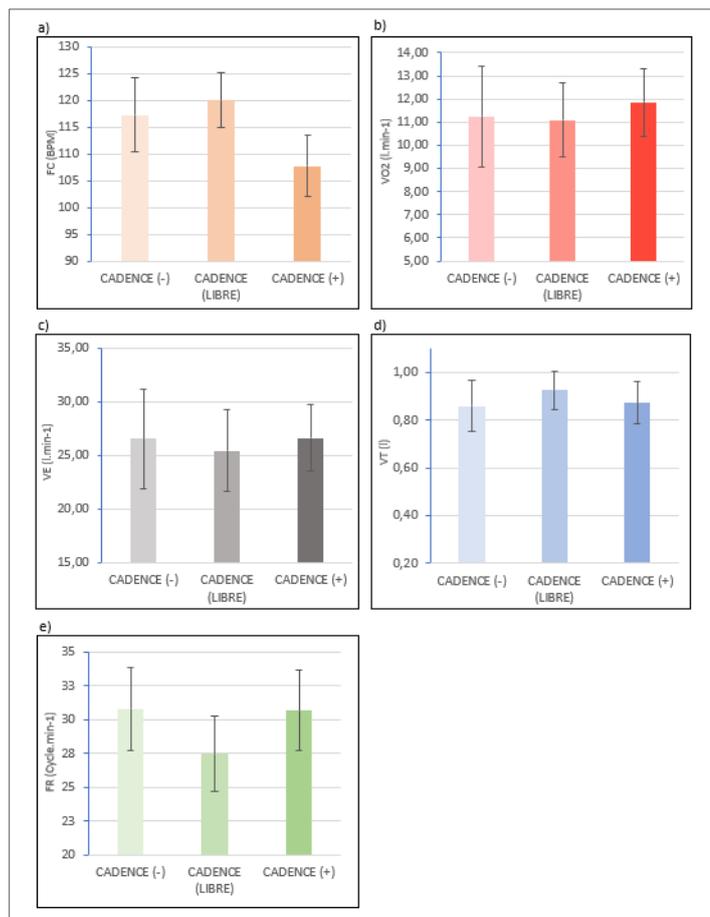


Figure 21 : Représentation graphique des valeurs moyennes du sujet 1 à CAD (-), CAD (L) et CAD (+). a) : FC (BPM) ; b) : V'O<sub>2</sub> (l.min<sup>-1</sup>), Consommation d'O<sub>2</sub> par minute Fréquence cardiaque ; c) : V'E (l.min<sup>-1</sup>), Ventilation minute ; d) : VT (l), volume courant ; e) : FR (cycle.min<sup>-1</sup>), Fréquence respiratoire.

Le sujet 1 a choisi une cadence libre de  $42 \pm 4$  RPM (moyen  $\pm$  SD) lors du premier test au SV1 pendant 5 min.

Pour ce sujet, les mesures du V'E, de la V'O<sub>2</sub> et de la FR étaient plus élevées à CAD (-) et CAD (+) en comparaison à CAD (L).

La CAD (+) et la CAD (-) ont augmenté le V'E avec un petit effet par rapport à la CAD (L) (CAD (-) = V'E +4,5% / CAD (+) = V'E +5%).

L'augmentation et la diminution de la fréquence de pédalage par rapport à la FPP a eu un effet modéré sur la diminution du VT (CAD (-) = -7,5% / CAD (+) = -6%) et l'augmentation de la FR (CAD (-) et CAD (+) = +12%) par rapport à la cadence préférentielle.

Pour la V'O<sub>2</sub> lors de CAD (-), l'effet a été cependant trivial, alors qu'il était faible pour la CAD (+) (CAD (-) : VO<sub>2</sub> = +1,5% / CAD (+) VO<sub>2</sub> = +7%).

La condition CAD (-) a eu un petit effet sur la diminution de la FC par rapport à CAD (L). On note à contrario un effet large de la CAD (+) sur la diminution de la FC par rapport à CAD (L) (CAD (-) FC = -2,5% / CAD (+) FC = -12%).

Le sujet 1 s'est toujours arrêté avant la fin du temps imposé. Il a respectivement effectué un temps d'épreuve de 3min14s, 4min02s et de 3min15s, pour CAD (-), CAD (L) et CAD (+). Le sujet a évoqué une dyspnée nécessitant l'arrêt de l'exercice pour chacune des conditions.

Résultats sujet 2 :

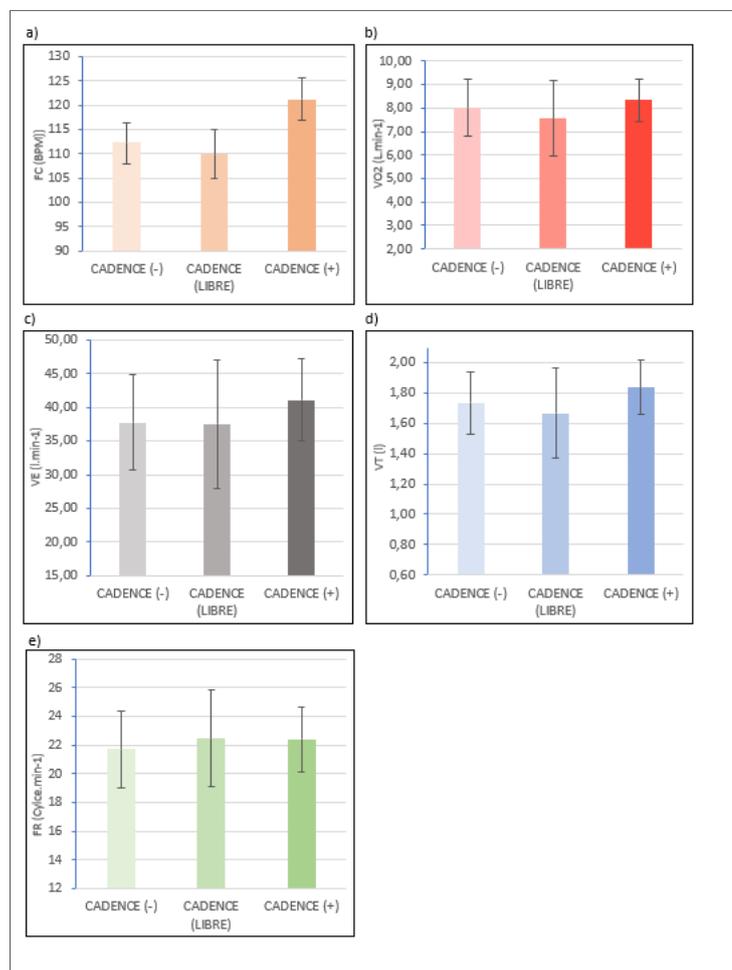


Figure 22 : Représentation graphique des valeurs moyennes du sujet 2 à CAD (-), CAD (L) et CAD (+). a) : FC (BPM) ; b) : V'O<sub>2</sub> (l.min<sup>-1</sup>), Consommation d'O<sub>2</sub> par minute Fréquence cardiaque ; c) : V'E (l.min<sup>-1</sup>), Ventilation minute ; d) : VT (l), volume courant ; e) : FR (cycle.min<sup>-1</sup>), Fréquence respiratoire.

Le sujet 2 a choisis une cadence libre de  $26 \pm 2$  RPM (moyen  $\pm$  SD), lors du premier test au SV1 pendant 5 min.

Pour ce sujet, les mesures du V'E, de la V'O<sub>2</sub>, de la FR et de la FC étaient plus élevées à CAD (-) et CAD (+) en comparaison à CAD (L). FR tant qu'à elle a été diminuée.

La CAD (-) a fait diminuer de manière faible la FR par rapport à CAD (L), alors que la CAD (+) a eu un effet trivial sur ce paramètre par rapport à la FPP (CAD (-) FR = -2% / CAD (+) FR = -0,3%).

La CAD (-) a eu un effet trivial sur l'augmentation du V'E et du VT par rapport à la CAD (L) (CAD (-) VE = +0,5% / CAD (-) VT = +4%). En revanche, cette condition a eu un petit effet sur l'augmentation de la FC et de la V'O<sub>2</sub> (CAD (-) FC = +2% / CAD (-) VO<sub>2</sub> = +6%).

Le V'E, le VT et la V'O<sub>2</sub> ont augmenté de manière faible par la CAD (+) par rapport à la condition avec la FPP (CAD (+) VE = +9,5% / CAD (+) VT et VO<sub>2</sub> = +10%). Cette condition de pédalage plus rapide a eu un large effet sur l'augmentation de la FC versus CAD (L) (CAD (+) FC = +10,5%). La cadence la plus basse de pédalage a entraîné une augmentation faible de la FC par rapport à la cadence de pédalage libre (CAD (-) FC = 2%).

Seul le sujet 2 est arrivé à terminer un des tests de 5 min au SV1 et cela pour la condition CAD (+). Pour la condition CAD (-) le sujet 2 a réalisé un temps de 2min53s. L'épreuve a donc pris fin, car le sujet ne pouvait plus continuer l'exercice à cause d'une fatigue musculaire au niveau des jambes et le début d'une dyspnée. Le temps d'effort a été de 4min06s pour la condition CAD (L), jusqu'au moment où le sujet ne pouvait plus continuer l'exercice à cause d'une fatigue musculaire importante au niveau de jambes.

### 3.3 Graphiques statistiques sujet 1 et 2

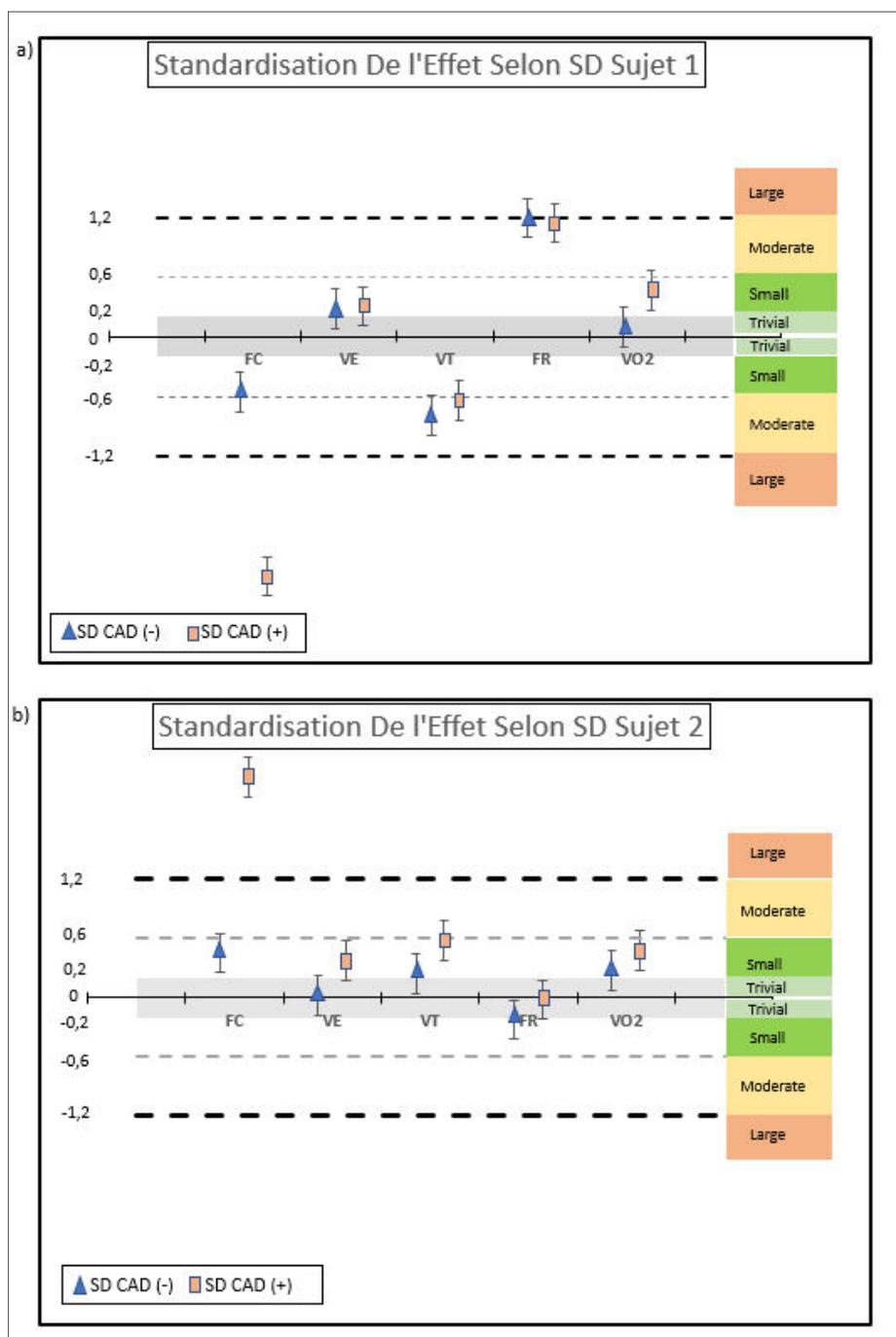


Figure 23: Graphiques statistiques des sujets représentant la standardisation de l'effet selon SD. a) : Sujet 1 ; b) Sujet 2.

### Discussion :

Deux résultats principaux ressortent de cette étude. Le premier est que les deux patients ont utilisé préférentiellement des cadences bien inférieures ( $34 \pm 8$  RPM (moyenne  $\pm$  SD)) au 60 RPM usuellement conseillé lors des tests incrémentaux ou lors

du réentraînement à l'effort. Ce résultat montre qu'il existe des préférences motrices lors du réentraînement sur cycloergomètre induite par la BPCO.

Le deuxième résultat important qui ressort de cette étude est que pour les deux patients la fréquence préférentielle de pédalage a diminué le coût énergétique de l'exercice. Le pédalage en CAD (+) a eu pour effet une augmentation de la  $V'O_2$  et ce pour les deux patients.

L'augmentation de la  $V'O_2$  avec la hausse de la cadence est en accord avec la littérature. Celle-ci pourrait s'expliquer par une augmentation de la dépense énergétique due à la respiration (Chavarren & Calbet, 1999). L'augmentation du V'E observé en comparaison à la CAD (L) vient renforcer cette idée. Cependant, l'augmentation du V'E et de la consommation énergétique des muscles respiratoires ne peuvent expliquer à eux seuls l'augmentation de la dépense énergétique. Il semble donc plus probable qu'un recrutement additionnel de muscles non-locomoteurs et/ou une augmentation du travail interne soient responsable de la plus grande  $V'O_2$  avec la cadence rapide (H. Zorgati et al., 2013).

Chez le sujet 2, la  $V'O_2$  a augmenté avec la diminution de la cadence également. Ceci pourrait être dû effectivement à une augmentation de la dépense énergétique comme l'a montré Chavarren et coll. (Chavarren & Calbet, 1999). L'utilisation d'une cadence différente de la FPP, induirait alors également une hausse du coût énergétique. Comme pour le sujet sain, la préférence motrice de pédalage sur ergocycle pourrait être proche de la cadence optimale énergétique chez le sujet BPCO pour un exercice continu d'intensité faible à modérée (Brisswalter et al., 2000 ; Takaishi et al., 1996). Chez ce même sujet, les exercices en fréquence de pédalage plus rapide et plus lente ont eu un effet respectivement large et faible sur la FC par rapport à la FPP, indiquant ainsi que l'intensité métabolique était plus grande dans ces deux conditions.

Ces résultats ne se retrouvent pas chez notre sujet 1. En effet, on note un effet inverse avec une diminution de la FC pour CAD (-) et CAD (+). Cela peut être expliqué par le fait que la BPCO est une maladie systémique et que le sujet 1 souffre d'une pathologie cardiaque associée à sa pathologie pulmonaire.

Ceux-ci nous montrent que les deux sujets ont eu de manière individuelle des réponses physiologiques différentes par la modification de la cadence, bien qu'ils suivent habituellement le même type de protocole d'entraînement et partagent la même pathologie.

Le sujet 2 a été le seul à terminer une des trois épreuves imposées et cela pour la condition CAD (+). Les paramètres observés ayant le plus variés pour ce sujet entre les trois conditions ont été une augmentation du VT et de la FC par la CAD (+). L'augmentation du VT pourrait donc être en cause dans le maintien ou non de l'exercice. La fréquence respiratoire tant qu'à elle a peu ou pas variée entre les trois conditions chez ce sujet.

Chez le sujet 1, le meilleur des trois temps d'exercice a été atteint en condition CAD (L). L'on peut remarquer chez les 2 sujets que le meilleur temps de maintien d'exercice a été obtenu, quand la fréquence respiratoire a été la plus basse et quand le VT a été le plus élevé.

Ce résultat est encourageant, car plusieurs études (Hayot et al., 2000 ; Vaz Fragoso et al., 1993) ont montré que, pour répondre à la demande métabolique, les sujets qui augmentent leur ventilation par la FR engendrent un véritable cercle vicieux aboutissant à une dyspnée pouvant précipiter l'arrêt de l'exercice.

Une autre étude a montré que l'amélioration qualitative de la respiration (légère augmentation du VT et diminution de la FR) à la suite d'un réentraînement à l'effort de six semaines augmentait la tolérance à l'effort (R. Casaburi et al., 1997), probablement en lien avec une diminution du phénomène de distension dynamique.

Chez le sujet sain, Dominelli et coll. (Dominelli et al., 2017) ont montré que, lorsque le débit sanguin du muscle respiratoire augmentait, celui du quadriceps diminuait. Il existerait alors une notion de relation compétitive entre les muscles respiratoires et les quadriceps pour le débit sanguin pendant l'exercice intense. Lorsque la demande respiratoire en débit sanguin est réduite, du sang supplémentaire peut être dirigé vers la musculature active. Cela signifie que, si le travail de la musculature respiratoire est élevé lors d'un exercice, on peut observer alors une atténuation du flux sanguin vers les muscles locomoteurs. Ce résultat pourrait expliquer la difficulté qu'ont pu avoir nos sujets BPCO stade 4 à terminer l'exercice et cela même pour des exercices au SV1. Cela pourrait être dû au fait que ces patients partent déjà avec une augmentation de la charge respiratoire due à leur pathologie avancée réduisant ainsi le flux sanguin disponible pour le membre inférieur à l'exercice. Le sujet 2 a pu terminer son exercice en CAD (+) en exécutant un travail moins de force sur les muscles locomoteurs, par l'augmentation de la vitesse de pédalage en permettant ainsi une fatigue musculaire moins précoce qu'aux autres conditions.

Zorgati et coll. (H. Zorgati et al., 2013) ont en effet montré que l'augmentation de la cadence permettait une augmentation du débit sanguin musculaire du quadriceps. Ce plus grand débit musculaire sanguin pourrait être lié à un plus grand débit cardiaque, comme le suggère l'augmentation de la FC chez ce patient à la fréquence de pédalage la plus rapide. De plus, le pédalage à des cadences élevées implique une augmentation du volume d'éjection systolique due à une meilleure action de la pompe musculaire (Gotshall, Bauer, & Fahrner, 1996).

Le sujet 2 a pu ainsi terminer l'exercice à cadence plus rapide, car celle-ci lui a permis d'améliorer ces paramètres cardio-ventilatoires, qui semblent être le principal facteur limitant dans ce cas-là. Le sujet 1, malgré l'amélioration des paramètres ventilatoires, n'a pas pu terminer l'exercice. L'on trouve chez ce sujet d'autres facteurs limitants. On peut suspecter notamment un problème musculaire au niveau de l'appareil locomoteur qui ne lui permet pas de compenser une augmentation du coût énergétique. De plus, la pathologie associée cardiaque ne lui permet pas les adaptations habituellement observées et nécessaires à l'exercice.

### **Conclusion :**

Cette étude préliminaire a permis de montrer que Les fréquences préférentielles de nos deux sujets sont loin des fréquences de 60 tours/min qui leur sont souvent proposées en centre de rééducation. Des fréquences trop rapides comme celle-ci ne ferait qu'augmenter la dépense énergétique et entraînerait un arrêt de l'exercice. La modification de la fréquence de pédalage à puissance constante affecte la ventilation du sujet BPCO. Il existe des différences importantes au niveau des réponses respiratoires induites par la cadence chez le BPCO ; et ce notamment au SV1 qui détermine la zone d'intensité de leur réentraînement habituel. Il s'agit de différences intra-individuelles, mais aussi inter-individuelles. Cela est dû à des pathologies associés à la BPCO qui reste une maladie systémique. De manière individuelle, les préférences de cadence et les pathologies associés doivent entraîner des prises en charge différentes et adaptées pour chaque individu. Il ne faut pas se contenter de donner une charge de travail uniquement en termes de puissance, mais il est important de s'intéresser au couple force-vitesse faisant intervenir des qualités motrices préférentielles, qui peuvent être différentes selon les individus partageant la même pathologie. Cette étude préliminaire a montré que le coût énergétique était inférieur

pour les fréquences préférentielles de pédalage, mais cela nous permet de voir aussi que celui-ci n'est pas forcément synonyme d'un maintien plus facile de l'effort. De plus, l'on constate qu'il est plus intéressant de se focaliser sur l'augmentation du V'E par le VT, qui semblerait être chez ces patients un des facteurs limitants au niveau ventilatoire à l'exercice, quand il est bas. Le facteur limitant peut être également le système musculaire. Ainsi, même si par la cadence nous pouvons améliorer la ventilation, il se peut que l'individu ne puisse réussir l'épreuve imposée à cause d'autres facteurs limitants (pathologies associés, système musculaire).

Sur un plan matériel il est important que les thérapeutes évaluateurs ou rééducateurs se renseignent sur les capacités des ergocycles qu'ils utilisent. Ceux-ci doivent avoir la capacité d'adapter le frein / la résistance en fonction de la cadence.

Il serait intéressant de continuer cette étude sur une plus grande cohorte, afin de consolider l'effet statistique de cette cadence à puissance constante sur les paramètres ventilatoires chez le BPCO. De plus, l'on pourrait se questionner sur la mise en place d'évaluations plus adaptées chez ces individus tenant compte notamment de la préférence motrice de pédalage et d'inclure ce paramètre dans la prise en charge pour la rééducation. Finalement, il serait intéressant d'investiguer l'effet d'un entraînement au SV1 en sous-cadence, en sur-cadence et à la cadence préférentielle chez les BPCO.

### **Déclaration d'intérêts**

Les auteurs déclarent ne pas avoir de conflits d'intérêts en relation avec cet article.

### **Remerciements :**

Les auteurs remercient les sujets qui ont participé à cette étude préliminaire, l'infirmière du CRCP et Odile FLEZ, cadre de santé MKDE au CRCP Franois, pour leur contribution au déroulement de cette étude.

Nous tenons à remercier également la société MATSPORT pour le prêt du matériel nécessaire et le Dr Johan Cassirame pour le temps précieux qu'il m'a apporté tout au long de cette étude.

## Références :

- Bergman, P., Bianchi, C., Boyer, F., & Célérier, S. (2014). Note méthodologique et de synthèse documentaire. "Comment mettre en oeuvre la réhabilitation respiratoire pour les patients ayant une bronchopneumopathie chronique obstructive ». HAS.
- Brisswalter, J., Hausswirth, C., Smith, D., Vercruyssen, F., & Vallier, J. M. (2000). Energetically optimal cadence vs. freely-chosen cadence during cycling: effect of exercise duration. *International Journal of Sports Medicine*, 21(1), 60-64. <https://doi.org/10.1055/s-2000-8857>
- Buchheit, M. (2016). The Numbers Will Love You Back in Return-I Promise. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 11(4), 551-554. <https://doi.org/10.1123/IJSPP.2016-0214>
- Casaburi, R., Porszasz, J., Burns, M. R., Carithers, E. R., Chang, R. S., & Cooper, C. B. (1997). Physiologic benefits of exercise training in rehabilitation of patients with severe chronic obstructive pulmonary disease. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 155(5), 1541-1551. <https://doi.org/10.1164/ajrccm.155.5.9154855>
- Chavarren, J., & Calbet, J. A. (1999). Cycling efficiency and pedalling frequency in road cyclists. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 80(6), 555-563. <https://doi.org/10.1007/s004210050634>
- Dominelli, P. B., Archiza, B., Ramsook, A. H., Mitchell, R. A., Peters, C. M., Molgat-Seon, Y., ... Sheel, A. W. (2017). Effects of respiratory muscle work on respiratory and locomotor blood flow during exercise. *Experimental Physiology*, 102(11), 1535-1547. <https://doi.org/10.1113/EP086566>
- Foss, Ø., & Hallén, J. (2004). The most economical cadence increases with increasing workload. *European Journal of Applied Physiology*, 92(4-5), 443-451. <https://doi.org/10.1007/s00421-004-1175-5>
- Garrod, R., Marshall, J., Barley, E., & Jones, P. W. (2006). Predictors of success and failure in pulmonary rehabilitation. *The European Respiratory Journal*, 27(4), 788-794. <https://doi.org/10.1183/09031936.06.00130605>
- Gotshall, R. W., Bauer, T. A., & Fahrner, S. L. (1996). Cycling cadence alters exercise hemodynamics. *International Journal of Sports Medicine*, 17(1), 17-21.
- Hayot, M., Ramonatxo, M., Matecki, S., Milic-Emili, J., & Prefaut, C. (2000). Noninvasive assessment of inspiratory muscle function during exercise. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 162(6), 2201-2207. <https://doi.org/10.1164/ajrccm.162.6.9912053>
- Hopkins, Will G., & Batterham, A. M. (2016). Error Rates, Decisive Outcomes and Publication Bias with Several Inferential Methods. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 46(10), 1563-1573. <https://doi.org/10.1007/s40279-016-0517-x>
- Hopkins, William G., Marshall, S. W., Batterham, A. M., & Hanin, J. (2009). Progressive statistics for studies in sports medicine and exercise science. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 41(1), 3-13. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e31818cb278>
- Kohl, J., Koller, E. A., & Jäger, M. (1981). Relation between pedalling- and breathing rhythm. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 47(3), 223-237.
- Lepers, R., Millet, G. Y., Maffiuletti, N. A., Hausswirth, C., & Brisswalter, J. (2001). Effect of pedalling rates on physiological response during endurance cycling. *European Journal of Applied Physiology*, 85(3-4), 392-395. <https://doi.org/10.1007/s004210100465>
- Marcadet, D.-M., Pavy, B., Bossier, G., Claudot, F., Corone, S., Douard, H., ... Carré, F. (2018). French Society of Cardiology guidelines on exercise tests (part 1): Methods and interpretation. *Archives of Cardiovascular Diseases*, 111(12), 782-790. <https://doi.org/10.1016/j.acvd.2018.05.005>

- Marthan, R. (2003). Epreuves d'exercice en pneumologie, 3.
- Mitchell, R. A., Boyle, K. G., Ramsook, A. H., Puyat, J. H., Henderson, W. R., Koehle, M. S., & Guenette, J. A. (2019). The Impact of Cycling Cadence on Respiratory and Hemodynamic Responses to Exercise. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000001960>
- Pavy, B., Iliou, M., Vergès, B., Brion, R., & Monpère, C. (2011). REFERENTIEL DES BONNES PRATIQUES DE LA READAPTATION CARDIAQUE DE L'ADULTE. GROUPE EXERCICE READAPTATION ET SPORT (G.E.R.S.) DE LA SOCIETE FRANCAISE DE CARDIOLOGIE. Repéré à <http://www.sfc cardio.fr/groupe s/groupe s/exercice-readaptation-sport/>
- Porszasz, J., Emtner, M., Goto, S., Somfay, A., Whipp, B. J., & Casaburi, R. (2005). Exercise Training Decreases Ventilatory Requirements and Exercise-Induced Hyperinflation at Submaximal Intensities in Patients With COPD. *Chest*, 128(4), 2025-2034. <https://doi.org/10.1378/chest.128.4.2025>
- Puente-Maestu, L., Sá n z, M. L., Sá n z, P., Ruíz de Oña, J. M., Rodríguez-Hermosa, J. L., & Whipp, B. J. (2000). Effects of two types of training on pulmonary and cardiac responses to moderate exercise in patients with COPD. *The European Respiratory Journal*, 15(6), 1026-1032.
- Richard, R., & Costes, F. (2018). Réalisation et interprétation d'une épreuve d'effort avec mesure des échanges gazeux. *Archives des Maladies du Coeur et des Vaisseaux - Pratique*, 2018(266), 2-7. <https://doi.org/10.1016/j.amcp.2018.01.002>
- Sala, E., Roca, J., Marrades, R. M., Alonso, J., Gonzalez De Suso, J. M., Moreno, A., ... Wagner, P. D. (1999). Effects of endurance training on skeletal muscle bioenergetics in chronic obstructive pulmonary disease. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 159(6), 1726-1734. <https://doi.org/10.1164/ajrccm.159.6.9804136>
- Sellier, Monpère, C., & Broustet, J.-P. (1997). Recommandations de la Société française de cardiologie concernant la pratique des épreuves d'effort chez l'adulte en cardiologie. «Évaluation fonctionnelle et réadaptation des cardiaques» de la Société française de cardiologie.
- Sullivan, G. M., & Feinn, R. (2012). Using Effect Size-or Why the P Value Is Not Enough. *Journal of Graduate Medical Education*, 4(3), 279-282. <https://doi.org/10.4300/JGME-D-12-00156.1>
- Takaishi, T., Yasuda, Y., Ono, T., & Moritani, T. (1996). Optimal pedaling rate estimated from neuromuscular fatigue for cyclists. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 28(12), 1492-1497.
- Takano, N. (1988). Effects of pedal rate on respiratory responses to incremental bicycle work. *The Journal of Physiology*, 396, 389-397.
- Troosters, T., Gosselink, R., & Decramer, M. (2001). Exercise training in COPD: how to distinguish responders from nonresponders. *Journal of Cardiopulmonary Rehabilitation*, 21(1), 10-17.
- Vaz Fragoso, C. A., Clark, T., & Kotch, A. (1993). The tidal volume response to incremental exercise in COPD. *Chest*, 103(5), 1438-1441.
- Vercruyssen, F., Missenard, O., & Brisswalter, J. (2009). Relationship between oxygen uptake slow component and surface EMG during heavy exercise in humans: influence of pedal rate. *Journal of Electromyography and Kinesiology: Official Journal of the International Society of Electrophysiological Kinesiology*, 19(4), 676-684. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2008.02.005>
- Yentes, J. M., Denton, W., Samson, K., Schmid, K. K., Wiens, C., & Rennard, S. I. (2019). Energy efficient physiologic coupling of gait and respiration is altered in chronic obstructive pulmonary disease. *Acta Physiologica (Oxford, England)*, 225(4), e13217. <https://doi.org/10.1111/apha.13217>

- Zorgati, H., Amiot, V., Collomp, K., Larue, J., & Prieur, F. (2013). Effet de la cadence de pédalage sur l'extraction de l'O<sub>2</sub> au niveau musculaire lors de l'exercice modéré. *Science & Sports*, 28(5), 291-294. <https://doi.org/10.1016/j.scispo.2012.04.006>
- Zorgati, Houssem, Collomp, K., Boone, J., Guimard, A., Buttelli, O., Mucci, P., ... Prieur, F. (2015). Effect of pedaling cadence on muscle oxygenation during high-intensity cycling until exhaustion: a comparison between untrained subjects and triathletes. *European Journal of Applied Physiology*, 115(12), 2681-2689. <https://doi.org/10.1007/s00421-015-3235-4>

## Références bibliographiques

- Alfarroba, S., Rodrigues, F., Papoila, A. L., Santos, A. F., & Morais, L. (2016). Pulmonary Rehabilitation in COPD According to Global Initiative for Chronic Obstructive Lung Disease Categories. *Respiratory Care*, 61(10), 1331-1340. <https://doi.org/10.4187/respcare.04414>
- Beaver, W. L., Wasserman, K., & Whipp, B. J. (1986). A new method for detecting anaerobic threshold by gas exchange. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985)*, 60(6), 2020-2027. <https://doi.org/10.1152/jappl.1986.60.6.2020>
- Bergman, P., Bianchi, C., Boyer, F., & Célérier, S. (2014). Note méthodologique et de synthèse documentaire. "Comment mettre en oeuvre la réhabilitation respiratoire pour les patients ayant une bronchopneumopathie chronique obstructive ». HAS.
- Bolton, C. E., Bevan-Smith, E. F., Blakey, J. D., Crowe, P., Elkin, S. L., Garrod, R., ... British Thoracic Society Standards of Care Committee. (2013). British Thoracic Society guideline on pulmonary rehabilitation in adults. *Thorax*, 68 Suppl 2, ii1-30. <https://doi.org/10.1136/thoraxjnl-2013-203808>
- Brisswalter, J., Hausswirth, C., Smith, D., Vercruyssen, F., & Vallier, J. M. (2000). Energetically optimal cadence vs. freely-chosen cadence during cycling: effect of exercise duration. *International Journal of Sports Medicine*, 21(1), 60-64. <https://doi.org/10.1055/s-2000-8857>
- Buchheit, M. (2016). The Numbers Will Love You Back in Return-I Promise. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 11(4), 551-554. <https://doi.org/10.1123/IJSPP.2016-0214>
- Burtin, C., Saey, D., Saglam, M., Langer, D., Gosselink, R., Janssens, W., ... Troosters, T. (2012). Effectiveness of exercise training in patients with COPD: the role of muscle fatigue. *The European Respiratory Journal*, 40(2), 338-344. <https://doi.org/10.1183/09031936.00111811>
- Casaburi, R., Porszasz, J., Burns, M. R., Carithers, E. R., Chang, R. S., & Cooper, C. B. (1997). Physiologic benefits of exercise training in rehabilitation of patients with severe chronic obstructive pulmonary disease. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 155(5), 1541-1551. <https://doi.org/10.1164/ajrccm.155.5.9154855>
- Casaburi, Richard. (1998). Rationale for anabolic therapy to facilitate rehabilitation in chronic obstructive pulmonary disease. *Baillière's Clinical Endocrinology and Metabolism*, 12(3), 407-418. [https://doi.org/10.1016/S0950-351X\(98\)80134-1](https://doi.org/10.1016/S0950-351X(98)80134-1)
- Chavarren, J., & Calbet, J. A. (1999). Cycling efficiency and pedalling frequency in road cyclists. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 80(6), 555-563. <https://doi.org/10.1007/s004210050634>
- Cohen-Solal, A., & Carré, F. (2009). *Guide pratique des épreuves d'effort cardiorespiratoires en cardiologie*. (S.l.) : Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-2-294-70359-1.X5000-9>
- Des Jardins, T. (2002). *Cardiopulmonary, Anatomy et Physiologie. Essentials for respiratory care*. (Fourth Edition). (S.l.) : Delmar / thomson Learning.
- Dominelli, P. B., Archiza, B., Ramsook, A. H., Mitchell, R. A., Peters, C. M., Molgat-Seon, Y., ... Sheel, A. W. (2017). Effects of respiratory muscle work on respiratory and locomotor blood flow during exercise. *Experimental Physiology*, 102(11), 1535-1547. <https://doi.org/10.1113/EP086566>
- Durnin, J. V., & Womersley, J. (1974). Body fat assessed from total body density and its estimation from skinfold thickness: measurements on 481 men and women aged from 16 to 72 years. *The British Journal of Nutrition*, 32(1), 77-97.
- Fan, V. S., Ramsey, S. D., Make, B. J., & Martinez, F. J. (2007). Physiologic variables and functional status independently predict COPD hospitalizations and emergency

- department visits in patients with severe COPD. *COPD*, 4(1), 29-39. <https://doi.org/10.1080/15412550601169430>
- Foss, Ø., & Hallén, J. (2004). The most economical cadence increases with increasing workload. *European Journal of Applied Physiology*, 92(4-5), 443-451. <https://doi.org/10.1007/s00421-004-1175-5>
- Fuhrman, C., & Delmas, M.-C. (2010). Épidémiologie descriptive de la bronchopneumopathie chronique obstructive (BPCO) en France. *Revue des Maladies Respiratoires*, 27(2), 160-168. <https://doi.org/10.1016/j.rmr.2009.08.003>
- Garrod, R., Marshall, J., Barley, E., & Jones, P. W. (2006). Predictors of success and failure in pulmonary rehabilitation. *The European Respiratory Journal*, 27(4), 788-794. <https://doi.org/10.1183/09031936.06.00130605>
- Gotshall, R. W., Bauer, T. A., & Fahrner, S. L. (1996). Cycling cadence alters exercise hemodynamics. *International Journal of Sports Medicine*, 17(1), 17-21.
- Hayot, M., Ramonatxo, M., Matecki, S., Milic-Emili, J., & Prefaut, C. (2000). Noninvasive assessment of inspiratory muscle function during exercise. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 162(6), 2201-2207. <https://doi.org/10.1164/ajrccm.162.6.9912053>
- Hopkins, Will G., & Batterham, A. M. (2016). Error Rates, Decisive Outcomes and Publication Bias with Several Inferential Methods. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 46(10), 1563-1573. <https://doi.org/10.1007/s40279-016-0517-x>
- Hopkins, William G., Marshall, S. W., Batterham, A. M., & Hanin, J. (2009). Progressive statistics for studies in sports medicine and exercise science. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 41(1), 3-13. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e31818cb278>
- Jónsdóttir, S., Andersen, K. K., Sigurosson, A. F., & Sigurosson, S. B. (2006). The effect of physical training in chronic heart failure. *European Journal of Heart Failure*, 8(1), 97-101. <https://doi.org/10.1016/j.ejheart.2005.05.002>
- Kohl, J., Koller, E. A., & Jäger, M. (1981). Relation between pedalling- and breathing rhythm. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 47(3), 223-237.
- Lemarie, E., Valeyre, D., & Housset, B. (2010). Revue des Maladies Respiratoires. *Revue des Maladies Respiratoires*. Repéré à <https://www.em-consulte.com/rmr/revue/rmr/27/S1>
- Lepers, R., Millet, G. Y., Maffiuletti, N. A., Hausswirth, C., & Brisswalter, J. (2001). Effect of pedalling rates on physiological response during endurance cycling. *European Journal of Applied Physiology*, 85(3-4), 392-395. <https://doi.org/10.1007/s004210100465>
- Marcadet, D.-M., Pavy, B., Bosser, G., Claudot, F., Corone, S., Douard, H., ... Carré, F. (2018a). French Society of Cardiology guidelines on exercise tests (part 1): Methods and interpretation. *Archives of Cardiovascular Diseases*, 111(12), 782-790. <https://doi.org/10.1016/j.acvd.2018.05.005>
- Marcadet, D.-M., Pavy, B., Bosser, G., Claudot, F., Corone, S., Douard, H., ... Carré, F. (2018b). French Society of Cardiology guidelines on exercise tests (part 1): Methods and interpretation. *Archives of Cardiovascular Diseases*, 111(12), 782-790. <https://doi.org/10.1016/j.acvd.2018.05.005>
- Marthan, R. (2003). Epreuves d'exercice en pneumologie, 3.
- Mitchell, R. A., Boyle, K. G., Ramsook, A. H., Puyat, J. H., Henderson, W. R., Koehle, M. S., & Guenette, J. A. (2019). The Impact of Cycling Cadence on Respiratory and Hemodynamic Responses to Exercise. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000001960>
- O'Donnell, D. E., & Webb, K. A. (2008). The major limitation to exercise performance in COPD is dynamic hyperinflation. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985)*, 105(2), 753-755; discussion 755-757. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.90336.2008b>
- Pavy, B., Iliou, M., Vergès, B., Brion, R., & Monpère, C. (2011). REFERENTIEL DES BONNES PRATIQUES DE LA READAPTATION CARDIAQUE DE L'ADULTE.

- Piperno, D., Huchon, G., Pribil, C., Boucot, I., & Similowski, T. (2003). The burden of COPD in France: results from the Confronting COPD survey. *Respiratory Medicine*, 97 Suppl C, S33-42.
- Porszasz, J., Emtner, M., Goto, S., Somfay, A., Whipp, B. J., & Casaburi, R. (2005a). Exercise training decreases ventilatory requirements and exercise-induced hyperinflation at submaximal intensities in patients with COPD. *Chest*, 128(4), 2025-2034. <https://doi.org/10.1378/chest.128.4.2025>
- Porszasz, J., Emtner, M., Goto, S., Somfay, A., Whipp, B. J., & Casaburi, R. (2005b). Exercise Training Decreases Ventilatory Requirements and Exercise-Induced Hyperinflation at Submaximal Intensities in Patients With COPD. *Chest*, 128(4), 2025-2034. <https://doi.org/10.1378/chest.128.4.2025>
- Puente-Maestu, L., Sá n z, M. L., Sá n z, P., Ruíz de Oña, J. M., Rodríguez-Hermosa, J. L., & Whipp, B. J. (2000). Effects of two types of training on pulmonary and cardiac responses to moderate exercise in patients with COPD. *The European Respiratory Journal*, 15(6), 1026-1032.
- Puhan, M. A., Gimeno-Santos, E., Scharplatz, M., Troosters, T., Walters, E. H., & Steurer, J. (2011). Pulmonary rehabilitation following exacerbations of chronic obstructive pulmonary disease. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, (10). <https://doi.org/10.1002/14651858.CD005305.pub3>
- Puhan, M. A., Scharplatz, M., Troosters, T., & Steurer, J. (2005). Respiratory rehabilitation after acute exacerbation of COPD may reduce risk for readmission and mortality -- a systematic review. *Respiratory Research*, 6, 54. <https://doi.org/10.1186/1465-9921-6-54>
- Richard, R., & Costes, F. (2018). Réalisation et interprétation d'une épreuve d'effort avec mesure des échanges gazeux. *Archives des Maladies du Coeur et des Vaisseaux - Pratique*, 2018(266), 2-7. <https://doi.org/10.1016/j.amcp.2018.01.002>
- Rousseau, J., & Cusenier, J. L. (2015). Analyse d'épreuves d'efforts chez les BPCO à différentes fréquences de pédalage, 21.
- Roversi, Sara, Fabbri, L. M., Sin, D. D., M. Hawkins, N., & Agustí, A. G. (2016). Chronic Obstructive Pulmonary Disease and Cardiac Diseases. An Urgent Need for Integrated Care | American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*. <https://doi.org/DOI: 10.1164/rccm.201604-0690SO>
- Rugbjerg, M., Iepsen, U. W., Jørgensen, K. J., & Lange, P. (2015). Effectiveness of pulmonary rehabilitation in COPD with mild symptoms: a systematic review with meta-analyses. *International Journal of Chronic Obstructive Pulmonary Disease*, 10, 791-801. <https://doi.org/10.2147/COPD.S78607>
- Sala, E., Roca, J., Marrades, R. M., Alonso, J., Gonzalez De Suso, J. M., Moreno, A., ... Wagner, P. D. (1999). Effects of endurance training on skeletal muscle bioenergetics in chronic obstructive pulmonary disease. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 159(6), 1726-1734. <https://doi.org/10.1164/ajrccm.159.6.9804136>
- Sellier, Monpère, C., & Broustet, J.-P. (1997). Recommandations de la Société française de cardiologie concernant la pratique des épreuves d'effort chez l'adulte en cardiologie. «Évaluation fonctionnelle et réadaptation des cardiaques» de la Société française de cardiologie.
- Sergysels, R., Similowski, T., & Roche, N. (2008). La distension doit-elle devenir la préoccupation principale de la prise en charge de la BPCO ? *Revue des Maladies Respiratoires*, 25(10), 1219-1222. [https://doi.org/10.1016/S0761-8425\(08\)75086-1](https://doi.org/10.1016/S0761-8425(08)75086-1)

- Seymour, J. M., Spruit, M. A., Hopkinson, N. S., Natanek, S. A., Man, W. D.-C., Jackson, A., ... Wouters, E. F. M. (2010). The prevalence of quadriceps weakness in COPD and the relationship with disease severity. *The European Respiratory Journal*, *36*(1), 81-88. <https://doi.org/10.1183/09031936.00104909>
- Shindoh, C., Hida, W., Kikuchi, Y., Taguchi, O., Miki, H., Takishima, T., & Shirato, K. (1994). Oxygen consumption of respiratory muscles in patients with COPD. *Chest*, *105*(3), 790-797.
- Spruit, M. A., Gosselink, R., Troosters, T., De Paepe, K., & Decramer, M. (2002). Resistance versus endurance training in patients with COPD and peripheral muscle weakness. *The European Respiratory Journal*, *19*(6), 1072-1078.
- Spruit, Martijn A., Singh, S. J., Garvey, C., ZuWallack, R., Nici, L., Rochester, C., ... ATS/ERS Task Force on Pulmonary Rehabilitation. (2013). An official American Thoracic Society/European Respiratory Society statement: key concepts and advances in pulmonary rehabilitation. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, *188*(8), e13-64. <https://doi.org/10.1164/rccm.201309-1634ST>
- Sullivan, G. M., & Feinn, R. (2012). Using Effect Size-or Why the P Value Is Not Enough. *Journal of Graduate Medical Education*, *4*(3), 279-282. <https://doi.org/10.4300/JGME-D-12-00156.1>
- Takaishi, T., Yasuda, Y., Ono, T., & Moritani, T. (1996). Optimal pedaling rate estimated from neuromuscular fatigue for cyclists. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *28*(12), 1492-1497.
- Takano, N. (1988). Effects of pedal rate on respiratory responses to incremental bicycle work. *The Journal of Physiology*, *396*, 389-397.
- Troosters, T., Gosselink, R., & Decramer, M. (2001). Exercise training in COPD: how to distinguish responders from nonresponders. *Journal of Cardiopulmonary Rehabilitation*, *21*(1), 10-17.
- Troosters, Thierry, Blondeel, A., Janssens, W., & Demeyer, H. (2019). The past, present and future of pulmonary rehabilitation: Pulmonary rehabilitation: Where do we go? *Respirology*. <https://doi.org/10.1111/resp.13517>
- Vaz Fragoso, C. A., Clark, T., & Kotch, A. (1993). The tidal volume response to incremental exercise in COPD. *Chest*, *103*(5), 1438-1441.
- Vercruyssen, F., Missenard, O., & Brisswalter, J. (2009). Relationship between oxygen uptake slow component and surface EMG during heavy exercise in humans: influence of pedal rate. *Journal of Electromyography and Kinesiology: Official Journal of the International Society of Electrophysiological Kinesiology*, *19*(4), 676-684. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2008.02.005>
- Vermes, E. (2018). Transplantation cardiaque et VO2 max : faut-il revoir les seuils? *REVUES GENERALES Chirurgie cardiaque*, *5*.
- Vestbo, J., Hurd, S. S., Agustí, A. G., Jones, P. W., Vogelmeier, C., Anzueto, A., ... Rodriguez-Roisin, R. (2013). Global strategy for the diagnosis, management, and prevention of chronic obstructive pulmonary disease: GOLD executive summary. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, *187*(4), 347-365. <https://doi.org/10.1164/rccm.201204-0596PP>
- Wasserman, K., Whipp, B. J., Koyle, S. N., & Beaver, W. L. (1973). Anaerobic threshold and respiratory gas exchange during exercise. *Journal of Applied Physiology*, *35*(2), 236-243. <https://doi.org/10.1152/jappl.1973.35.2.236>
- West, J. B., & Andrew, M. L. (2018). *Physiologie Respiratoire L'essentiel* (10ème édition). (S.l.) : Maloine.
- Yentes, J. M., Denton, W., Samson, K., Schmid, K. K., Wiens, C., & Rennard, S. I. (2019). Energy efficient physiologic coupling of gait and respiration is altered in chronic obstructive pulmonary disease. *Acta Physiologica (Oxford, England)*, *225*(4), e13217. <https://doi.org/10.1111/apha.13217>

- Zorgati, H., Amiot, V., Collomp, K., Larue, J., & Prieur, F. (2013). Effet de la cadence de pédalage sur l'extraction de l'O<sub>2</sub> au niveau musculaire lors de l'exercice modéré. *Science & Sports*, 28(5), 291-294. <https://doi.org/10.1016/j.scispo.2012.04.006>
- Zorgati, Houssem, Collomp, K., Boone, J., Guimard, A., Buttelli, O., Mucci, P., ... Prieur, F. (2015a). Effect of pedaling cadence on muscle oxygenation during high-intensity cycling until exhaustion: a comparison between untrained subjects and triathletes. *European Journal of Applied Physiology*, 115(12), 2681-2689. <https://doi.org/10.1007/s00421-015-3235-4>
- Zorgati, Houssem, Collomp, K., Boone, J., Guimard, A., Buttelli, O., Mucci, P., ... Prieur, F. (2015b). Effect of pedaling cadence on muscle oxygenation during high-intensity cycling until exhaustion: a comparison between untrained subjects and triathletes. *European Journal of Applied Physiology*, 115(12), 2681-2689. <https://doi.org/10.1007/s00421-015-3235-4>

# ANNEXES

## Annexe I : Résumé du protocole

Lieu de la recherche	Nom : CRCP des Hauts de Chazal  Adresse :  9 Chemin des Quatre Journaux  25770 Besançon-Francois  Tél. 03 81 41 80 68  Fax 03 81 41 86 68	
Nom du promoteur :	CHRU de Besançon  2, Place Saint-Jacques  25030 Besançon Cedex  Email : recherche@chu-besancon.fr	
Titre de l'étude	Quels sont les effets de la variation de la cadence de pédalage au cours d'un effort sous-maximal au seuil ventilatoire à puissance constante sur les échanges gazeux et la mécanique respiratoire dans la BPCO	
Lieu de la recherche	CRCP des Hauts de Chazal  9 Chemin des Quatre Journaux  25770 Besançon-Francois	
Durée de l'essai par sujet	Durée totale prévue par sujet	5 demi-journées (1h maximum / visite)
Objectif de l'essai :	Objectifs principaux :  Evaluer les effets de différentes fréquences de pédalage au cours d'un effort sous-maximal au seuil ventilatoire sur les échanges gazeux et la ventilation pour une même puissance donnée chez le BPCO.	

	<p>Critères secondaires :</p> <p>Observer l'effet de la cadence sur la fréquence cardiaque (FC), la saturation (SpO<sub>2</sub>) et la dyspnée chez le BPCO.</p> <p>Observer au SV1 la fréquence de pédalage préférentielle du BPCO.</p> <p>Dégager les implications et recommandations pour la prise en charge de ces patients, par une modulation de la fréquence de pédalage en concevant la même puissance cible, lors du réentraînement au SV1.</p>
Méthodologie :	<p>L'étude comporte 5 visites :</p> <p>V0 (T1 - 1 à 2 semaines) = inclusion</p> <p>T1 = test sportif PMA</p> <p>V1 (T1 + 72h) = Exercice au seuil ventilatoire, Cadence libre = CAD (L)</p> <p>V2 (V1 + 72h) = Variation de la cadence supérieure de 15% et 25% à CAD (L) = CAD (+)</p> <p>V3 (V2 + 72h) = Variation de la Fr pédalage inférieure de -15% et -25% à CAD (L) = CAD (-)</p> <p>Une distribution aléatoire sera faite entre V2 et V3</p>
Population étudiée :	<p>12 patients ayant une BPCO sévère du centre de réadaptation. Stade : Gold stade 3-4.</p>
Critères d'inclusion :	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sujet masculin et/ou féminin ; Age : 40 à 80 ans (bornes incluses).</li> <li>- GOLD = [3;4]</li> <li>- Sujet ayant un IMC compris entre 18,5 kg/m<sup>2</sup> et 26 kg/m<sup>2</sup> (bornes incluses).</li> <li>- Sujet non-fumeur / ou sevré</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sujet ayant un poids stable depuis au moins 1 mois avant le début de l'étude.</li> <li>- Sujet ayant des habitudes alimentaires stables depuis au moins un mois avant le début de l'étude et acceptant de conserver ses habitudes alimentaires pendant l'étude.</li> <li>- Sujet capable et désireux de se conformer au protocole et acceptant de donner son consentement éclairé par écrit.</li> <li>- Sujet affilié à un régime de sécurité sociale.</li> <li>- Sujet acceptant d'être inscrit au fichier national des volontaires qui se prêtent à des recherches biomédicales.</li> </ul>
Critères de non-inclusion :	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pa systolique <math>\geq</math> à 15mmhg ; Pa systolique- Pa diastolique <math>\leq</math>40mmhg.</li> <li>- Cardiopathie obstructive sévère</li> <li>- Rétrécissement valvulaire aortique serré</li> <li>- Troubles du rythme ou conductifs cardiaques sévères évolutifs non-appareillés et dépistés lors du test d'effort initial</li> <li>- Thrombus intra-cavitaire cardiaque</li> <li>- Hypertension artérielle pulmonaire sévère (HTAP systolique <math>&gt;</math>70mmHg)</li> <li>- Antécédents trombo-emboliques veineux récents (3 derniers mois)</li> <li>- Affection médicale associée pouvant altérer de façon prédominante les capacités fonctionnelles (exemples : troubles métaboliques non-stabilisés tels qu'une insuffisance rénale évolutive, une asthénie importante liée à une affection sévère non stabilisée telles que néoplasie, maladie systémique...)</li> <li>- Incompétences physiques des membres inférieurs gênant le réentraînement à l'effort, qu'elles soient</li> </ul>

	<p>d'origine neurologique (centrale ou périphérique), d'origine artérielle (en particulier, artériopathie des membres inférieurs avec index systolique &lt; 0.6) ou orthopédique (rhumatismes dégénératifs ou inflammatoires)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Patients ayant participé (dans un délai de moins de six mois) ou participant à un programme de réadaptation</li> <li>- Sujet ayant été blessé dans les trois mois qui précèdent le début de l'étude.</li> <li>- Sujet ayant des habitudes alimentaires extrêmes.</li> <li>- Sujet consommant plus de deux verres d'alcool par jour (tous les jours).</li> <li>- Sujet participant à une autre étude clinique ou en période d'exclusion d'une précédente étude clinique.</li> <li>- Sujet ayant perçu un montant total d'indemnités supérieur à 4500 euros depuis le début de l'année civile.</li> <li>- Sujet ayant une incapacité linguistique ou psychique de signer le consentement éclairé.</li> <li>- Sujet refusant de donner son consentement par écrit.</li> <li>- Sujet privé de liberté par décision administrative ou judiciaire, sous tutelle ou curatelle.</li> <li>- Sujet impossible à contacter par téléphone en cas d'urgence.</li> </ul>
Critères d'évaluation	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Echanges gazeux cycle à cycle, avec mesure de la fréquence respiratoire, <math>FIO_2</math>, <math>FEO_2</math>, et <math>FICO_2</math>, <math>FECO_2</math>. Mesure de la consommation d'oxygène maximale par minute <math>V'O_2</math> max et <math>V'O_2</math> et élimination du <math>CO_2</math>.</li> <li>- Fréquence respiratoire (FR)</li> <li>- Saturation <math>O_2</math> (<math>SpO_2</math>)</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fréquence cardiaque (FC)</li> <li>- Pression artérielle : Pa repos et pendant l'effort</li> <li>- Puissance mécanique sur ergomètre</li> <li>- Température (salle et sujet) et hygrométrie</li> <li>- Evaluation de l'effort, et dyspnée via EVA.</li> </ul>
Durée expérimentation	1 mois maximum
Statistiques	<p>Plan statistique :</p> <p>L'analyse statistique sera réalisée par VARENNE Nicolas étudiant en 4ème année de kinésithérapie à l'ISTR Université Lyon 1, encadré et supervisé par Mr BILLET Didier, MK D.E spécialisé en cardiologie respiratoire et titulaire d'un master recherche en statistique, enseignant à l'ISTR Université Lyon 1 et coordonnateur du diplôme universitaire de kinésithérapie respiratoire et cardiovasculaire à l'ISTR Lyon 1.</p> <p>Le traitement statistique sera effectué à l'aide du logiciel SPSS.</p> <p>Description de l'échantillon étudié :</p> <p>La description des sujets à la visite d'inclusion sera réalisée par la statistique descriptive des caractéristiques disponibles du sujet, avec la moyenne (Moy) et l'écart type (SD) (âge, sexe, type, taille, poids, IMC, composition corporelle, indice de BODE, fréquence de pédalage préférentielle (FPP), puissance maximale aérobie (PMA), puissance au SV1).</p> <p>Les critères biologiques, de même que l'ensemble des autres paramètres mesurés à chaque visite feront l'objet de statistiques descriptives.</p> <p>Seuil de signification statistique :</p> <p>Le seuil de 5% sera utilisé pour toutes les analyses.</p>

Analyse des résultats :

Une ANOVA (Sujets12XTempsXCadence) va être effectuée avec comme variable indépendante :

- Cadence entre CAD (L), CAD (+) et CAD (-)
- Temps avec deux modalités : P1 (2min30) / P2 (5min)

Les variables dépendantes étudiées seront :

VO<sub>2</sub>, VE, VT, FR, FC, et, Pa, SaO<sub>2</sub>

Plusieurs résultats seront ensuite analysés :

Premièrement, il s'agira d'une comparaison entre les périodes P1, P2 de CAD (L), puis de CAD (+) et CAD (-). Dans un second temps, entre les périodes P1, P2 entre CAD (+) et CAD (-) ; CAD (L) et CAD (+) ; CAD (-) et CAD (L).

Méthode de prise en compte des données manquantes, inutilisées et non valides :

Aucune imputation des valeurs manquantes n'est prévue.

Gestion des modifications apportées au plan d'analyse de la stratégie initiale :

Le plan d'analyse statistique sera rédigé à l'aveugle des données. Si des modifications doivent être apportées dans les méthodes décrites ci-dessus, elles seront validées par le statisticien de référence.

Choix des personnes à inclure dans les analyses :

L'analyse sera réalisée sur la population ITT, c'est-à-dire sur l'ensemble des sujets inclus et randomisés ayant terminés ou non l'étude.



## Résumé

Le réentraînement à l'exercice fait partie intégrante de la réadaptation respiratoire, cependant même si des études ont permis d'affiner les intensités de travail, peut d'entre elles se sont intéressées à la motricité des patients durant ces exercices. De nouvelles modalités de réentraînement basé sur la motricité préférentielle du patient souffrant de Bronchopneumopathie chronique obstructive (BPCO) pourraient être intéressante pour l'optimisation du réentraînement. Chez le sujet sain, la fréquence de pédalage contrôlée et préférentielle est caractérisée par un coût énergétique plus faible ; chez les patients BPCO, elle pourrait permettre d'optimiser les échanges gazeux et le réentraînement. L'augmentation de la cadence chez le sujet sain entraîne une augmentation de la  $V'O_2$ ,  $V'E$  et  $VT$ , ce qui pourrait augmenter par la même la dyspnée, la fatigue musculaire et l'hyperinflation dynamique chez le sujet BPCO. Ces observations contrastent et questionnent sur le choix des fréquences de pédalage imposées aux patients en pratique courante. Si les fréquences de pédalage se situant aux alentours de 60 RPM sont bien tolérées en réadaptation cardiaque ; spécialité pionnière du réentraînement à l'effort, elles pourraient être inadaptées chez des patients souffrant de BPCO sévère et présentant une distension dynamique de repos et/ou d'effort.

Nous pensons qu'en variant cette fréquence mécanique, notamment vers des cadences préférentielles pour une même puissance, nous pourrions améliorer ou diminuer des paramètres d'échange gazeux, comme la diffusion alvéolo-capillaire, l'hyperinflation dynamique, la fatigue des muscles respiratoire et la dyspnée chez des patients atteints de pathologies respiratoire chronique.

**Mots-clés :** BPCO, cadence de pédalage, exercice modérée, fréquence respiratoire, kinésithérapie respiratoire, rééducation, réhabilitation, réponse cardio-ventilatoire, seuil ventilatoire, ventilation.