

L'entraînement des muscles inspireurs : une stratégie efficace dans le sevrage de la ventilation mécanique

Inspiratory Muscle Training: An Efficient Strategy to Wean from Mechanical Ventilation

V. Lesage · F.E. Gravier · C. Médrinal · T. Bonnevie

Reçu le 10 septembre 2015 ; accepté le 26 octobre 2015
© SRLF et Lavoisier SAS 2015

Résumé La dysfonction diaphragmatique est l'une des conséquences néfastes de la ventilation mécanique (VM). Cette atteinte se caractérise par une faiblesse musculaire et induit des difficultés de sevrage ventilatoire. L'entraînement spécifique des muscles inspireurs (EMI) apparaît donc comme une approche pertinente pour favoriser le sevrage de la VM. La littérature publiée récemment renforce l'intérêt de cette technique en réanimation, notamment chez les patients présentant une faiblesse musculaire inspiratoire et en échec de sevrage. L'EMI est cependant encore peu répandu, bien qu'il soit facile à mettre en œuvre et qu'il ne nécessite que peu de matériel.

Mots clés Dysfonction diaphragmatique · Entraînement des muscles inspireurs · Kinésithérapie · Sevrage ventilatoire · Ventilation mécanique.

Abstract Diaphragmatic dysfunction is a harmful consequence induced by mechanical ventilation (MV). This respiratory weakness leads to weaning difficulties. Inspiratory muscle training (IMT) seems to be relevant for increasing patient's inspiratory muscular capacity and improving weaning from MV. The literature recently published promotes the interest of IMT in intensive care unit to improve weaning for patients with inspiratory muscles weakness and presenting weaning difficulties. However, IMT is not frequently

used yet, although this technique is easy and requires little equipment.

Keywords Diaphragmatic dysfunction · Inspiratory muscle training · Mechanical ventilation · Physiotherapy · Weaning

Introduction

Lors de l'admission en service de réanimation, la mise en jeu du pronostic vital des patients nécessite couramment le recours à de lourdes thérapeutiques. Parmi les stratégies mises en œuvre, la ventilation mécanique invasive (VM) est l'une des plus courantes. En 2011, la Société de réanimation de langue française (SRLF) estime qu'en fonction de la spécialité des réanimations, 40 à 70 % des patients admis sont ventilés [1]. Paradoxalement, la VM expose les patients à plusieurs complications et son sevrage est difficile pour environ 30 % d'entre eux [2].

Les causes de difficulté de sevrage sont multiples, mais l'une d'elles est l'atteinte des muscles inspireurs, en particulier du diaphragme. Cette atteinte est induite par la VM elle-même et est connue sous le nom de dysfonction diaphragmatique induite par la VM (DDIVM) [3]. Nous pouvons distinguer trois manifestations de la DDIVM : l'atrophie musculaire, l'atteinte de l'ultrastructure et la diminution de la contractilité [4]. Elles sont dues à plusieurs facteurs, tels le sepsis, la défaillance multiviscérale, la faiblesse musculaire acquise en réanimation (ICUaw), la médication (curares, sédation, etc.). En outre, de nombreuses études ont mis en évidence l'implication de la ventilation mécanique contrôlée (VC) dans l'apparition rapide de la DDIVM [5-9]. Dix-huit à 69 heures de VC sont suffisantes pour diminuer de plus de 50 % la surface de section transversale de fibres diaphragmatiques [7]. De plus, la DDIVM s'accroît proportionnellement à la durée de la VM [5,8]. Elle est ainsi responsable de difficultés de sevrage chez de nombreux patients ventilés et induit un mauvais pronostic, une altération de la qualité de

V. Lesage (✉)

1 rue des Canadiens, F-76260 Saint-Rémy-Boscrocourt
e-mail : v.lesage@gmail.com

F.E. Gravier · T. Bonnevie
ADIR association, 147 avenue du Maréchal Juin,
F-76230 Bois-Guillaume

C. Médrinal
Groupe de travail en kinésithérapie (GTK),
service de réanimation médicochirurgicale,
groupe hospitalier du Havre, avenue Pierre Mendès France,
F-76290 Montivillers

vie et un risque important de soins prolongés même après réussite du sevrage [2,10-12].

Pour lutter contre l'ensemble de ces facteurs et ainsi prévenir les difficultés de sevrage, l'entraînement des muscles inspirateurs (EMI) est proposé. Les nouvelles données issues de la littérature et leur implication clinique justifient la mise à jour de l'article publié en 2013 [13], afin de guider les kinésithérapeutes dans leur pratique courante et de faciliter l'implémentation de cette technique en service de réanimation.

L'intérêt clinique de l'EMI ?

Le principe de l'EMI est fondé sur la correction du déséquilibre entre la charge de travail imposée aux muscles inspirateurs, qui est majorée lors de la VM, et leur capacité, qui est altérée. Cet entraînement spécifique, issu de la prise en charge des patients insuffisants respiratoires stables, a tout d'abord été introduit dans le milieu de la réanimation pour les patients en échec de sevrage [11,14-17]. Ainsi, l'European Respiratory Society (ERS) le recommande depuis 2008 pour les patients présentant « une défaillance des muscles respiratoires et en échec de sevrage » (grade C) [14].

Afin de confirmer le bénéfice de l'EMI, Moodie et al. [18] ont réalisé une méta-analyse (2011) reprenant les données de trois essais : l'un étudiant l'effet de l'EMI chez des patients trachéotomisés en échec de sevrage [16], un autre l'EMI par valve à seuil chez des patients intubés depuis moins de 24h [19] et un dernier étudiant l'EMI par modification du trigger inspiratoire chez des patients sédatisés [20].

Cette méta-analyse rapporte une augmentation significative de la Pi_{max} (+8 cmH₂O) en faveur des patients bénéficiant d'EMI. L'origine de cette amélioration reste discutée : hypertrophie musculaire, amélioration de la coordination neuromusculaire, effet d'apprentissage [7,9,15-17]. Notons que l'étude évaluant la modification du trigger inspiratoire est la seule à ne pas retrouver d'amélioration significative de la Pi_{max} [20].

Malgré ces premières observations, la méta-analyse n'a retrouvé aucune diminution de la durée de sevrage ni de la durée de VM, ni aucune amélioration significative du succès de sevrage. Seule une étude retrouve une réduction significative de 1,7 jour de la durée de sevrage en faveur du groupe EMI [19]. Néanmoins, rapportée à la durée totale de VM, cette diminution n'est plus significative.

Plus récemment, Condessa et al. [21] ont retrouvé des résultats similaires suite à un EMI réalisé par valve à seuil dans une population de 92 patients intubés depuis au moins 48h. Malgré une augmentation de la Pi_{max} , l'exclusion de nombreux patients au cours du protocole n'a pas permis aux auteurs d'atteindre le nombre de patients calculé a priori pour démontrer une différence sur la durée de la VM et le succès du sevrage.

D'autre part, cette étude a montré une amélioration de la Pe_{max} pour les patients entraînés. Ce résultat est intéressant, car certains patients en échec de sevrage présentent un déficit de toux.

In fine, l'intérêt de l'amélioration de la Pi_{max} est un élément discutable. Le rapport entre l'augmentation de la Pi_{max} et le succès de sevrage a été analysé dans une seule étude [16]. En fin d'entraînement, les patients sevrés (n=41/69) présentaient une augmentation de la Pi_{max} significativement plus importante que les patients non sevrés (n=28/69).

Bien que la force musculaire inspiratoire soit un facteur décisif pour le succès de l'extubation, celui-ci reste multifactoriel. D'ailleurs, pour une valeur de 20 cmH₂O considérée comme valeur prédictive d'un succès de sevrage [2], la Pi_{max} a une sensibilité de 0,86 et une spécificité de 0,72 [22].

Ainsi, les premières données de la littérature confirment l'effet de l'EMI sur le gain de force des muscles respiratoires. Néanmoins, l'amélioration seule de la Pi_{max} , sans autre bénéfice cliniquement pertinent (durée de sevrage, de ventilation, succès de sevrage, etc.) ne permet pas de justifier sa réalisation en pratique courante dans les services de réanimation. Face à ces résultats toutefois encourageants, plusieurs travaux de recherche ont été réalisés et viennent aujourd'hui apporter des réponses ayant d'importantes implications cliniques.

De nouvelles perspectives pour l'EMI

La méta-analyse initialement publiée par Moodie et al. (2011) a été mise à jour en 2015 [18,23]. Dix essais regroupant 394 patients ont ainsi pu être colligés et analysés. Parmi eux figurent les quatre études précédemment citées [16,19-21], ainsi que six autres publiées récemment [24-29].

Les conclusions de cette méta-analyse confirment l'effet de l'EMI sur la Pi_{max} avec une augmentation significative de 7 cmH₂O. Elles relèvent une forte tendance à la réduction de la durée de sevrage de 1,7 jour. De plus, l'analyse de sous-groupe souligne une diminution significative de cette durée pour les patients présentant des difficultés de sevrage.

Par ailleurs, le succès du sevrage est également amélioré (RR de 1,34 [IC 95 %: 1,02-1,76]). L'EMI permettrait également une diminution significative de la durée de séjour en réanimation [24,29], ainsi que de la durée de séjour à l'hôpital [29]. Cependant, les résultats sur la durée totale de VM, le taux de réintubation, de trachéotomie et de survie ne sont pas significatifs, même s'ils semblent positivement influencés par l'EMI. Enfin, si l'EMI ne permet pas d'éviter le recours à la VNI en post-extubation [21], il permet d'en réduire la durée [19].

À l'heure actuelle, les données disponibles sur l'effet de l'EMI permettent donc de supposer que sa mise en place apporte des bénéfices pour les patients ventilés. Des

indications pratiques doivent être proposées afin de faciliter l'intégration de l'EMI au sein des protocoles de sevrage.

Place de l'EMI dans les services de réanimation français

Une enquête récente, à laquelle ont répondu 99 % des services de réanimation français, a mis en évidence que seul un tiers des thérapeutes pratiquent l'EMI [30]. Soixante-quatre pour cent justifient le manque de connaissance de cette approche pour les patients ventilés. Un thérapeute sur cinq ne pratiquant pas l'EMI souligne le manque de littérature confirmant son intérêt clinique.

D'autre part, cette enquête révèle des disparités dans les pratiques. Tout d'abord, l'une des principales indications est l'échec de sevrage (environ un tiers des répondants). Un tiers le réalise systématiquement et seulement 5 % le pratiquent en cas de faiblesse des muscles inspirateurs ($P_{i_{max}} < 20 \text{ cmH}_2\text{O}$).

Les techniques d'EMI les plus utilisées sont paradoxalement les moins évaluées dans la littérature : ventilation dirigée abdominodiaphragmatique (83 %), respirations profondes (59 %), spirométrie incitative (41 %). Ces techniques sont sans résistance pour les muscles respiratoires et ne peuvent être considérées comme des techniques de renforcement musculaire. Cette affirmation s'appuie par un travail qui a comparé l'efficacité d'un EMI réalisé par un appareil de spirométrie incitative vs un système de valve à seuil chez une population de femmes sans pathologie. Les résultats de cette étude ont confirmé la supériorité de l'entraînement par valve à seuil [31].

Pendant, seuls 13 % des thérapeutes pratiquant l'EMI utilisent au moins une technique évaluée dans la littérature (valve à seuil ou modification du trigger inspiratoire du ventilateur).

La mise en place de ce type d'entraînement nécessite également une évaluation systématique de la fonction musculaire respiratoire par une mesure de la $P_{i_{max}}$ selon des procédures adaptées à une population de patients ventilés [32]. Cette évaluation a pour but d'adapter la charge de travail initiale, mais aussi de suivre l'évolution de l'entraînement. Or, parmi les thérapeutes pratiquant l'EMI, seuls 16 % évaluent la $P_{i_{max}}$. Seuls six répondants (2 %) utilisent à la fois une méthode d'entraînement basée sur la littérature et une évaluation correcte de la $P_{i_{max}}$.

Le constat dressé par cette enquête souligne la nécessité d'établir un référentiel pratique guidant les kinésithérapeutes voulant réaliser un EMI. Les paragraphes suivants se proposent de résumer les données de la littérature afin de faciliter la mise en place d'un programme adapté aux patients ventilés au cours de leur séjour en service de réanimation.

Modalités pratiques de l'EMI

Évaluation de la force des muscles inspirateurs du patient ventilé : mesure de la $P_{i_{max}}$

Comme tout programme de renforcement musculaire, la mise en place de l'EMI nécessite une évaluation régulière (initiale et de suivi) de la force des muscles inspirateurs. La mesure de la $P_{i_{max}}$ permet une évaluation non invasive de cette fonction musculaire. Malheureusement, elle nécessite la participation active du patient, parfois difficile à obtenir en service de réanimation [33]. Afin de résoudre ce problème, Caruso et al. ont proposé une méthode standardisée permettant d'obtenir une valeur reproductible et maximale de la $P_{i_{max}}$ chez les patients ventilés [32]. Cette mesure peut être réalisée à l'aide d'un manomètre électronique associé à une valve unidirectionnelle permettant une occlusion à l'inspiration. Afin de pallier le manque de coopération de nombreux patients ventilés, l'occlusion inspiratoire doit être maintenue 20 s afin d'obtenir une mesure maximale au volume résiduel. La mesure doit être répétée trois fois en retenant la valeur la plus importante ; le patient bénéficie d'un temps de repos sous VM entre chaque mesure.

Cette mesure peut également être réalisée par la fonction NIF (*Negative Inspiratory Force*) du respirateur. Cette dernière permet l'évaluation de la $P_{i_{max}}$ sans matériel supplémentaire et sans déventiler le patient. Elle se réalise par occlusion des valves et bloque l'inspiration et l'expiration du patient.

Les valeurs obtenues peuvent différer entre les deux méthodes (manomètre électronique ou fonction NIF). La

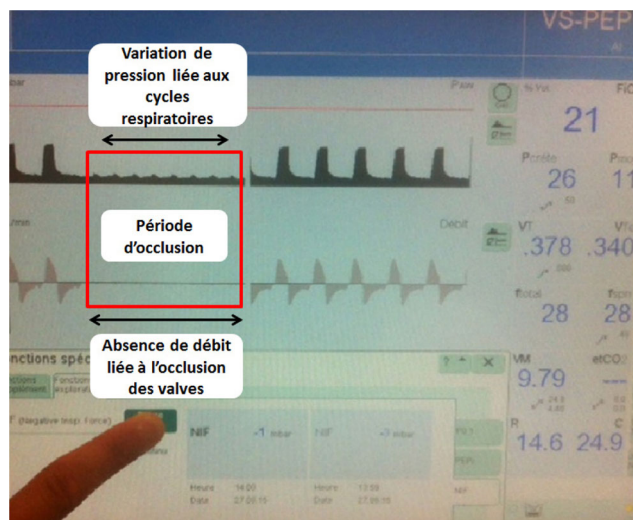


Fig. 1 Mesure de la pression inspiratoire maximale par la fonction NIF du ventilateur. L'occlusion des valves inspiratoire et expiratoire ne permet pas une vidange pulmonaire jusqu'au volume résiduel comme le montre l'absence de débit sur cette figure

Tableau 1 Programmes d'entraînement des muscles inspirateurs décrits dans la littérature				
1^{er} auteur (année)	Protocole de sevrage	Protocole de sédation	Intervention du kinésithérapeute	Protocole d'entraînement
Martin et al. (2011) [16]	Oui	Non documenté	Non documenté	<i>Intensité</i> : maximale tolérée. <i>Modalité</i> : quatre séries ; 6 à 10 respirations ; 2 min de repos sous VM entre les séries. <i>Fréquence</i> : 5x/sem ; jusqu'au sevrage. <i>Progression</i> : augmentation quotidienne selon la tolérance.
Cader et al. (2010) [19]	Oui	Non documenté	KR + Mobilisations passives et actives	<i>Intensité</i> : 30 % $P_{i_{max}}$. <i>Modalité</i> : 5 min. <i>Fréquence</i> : 2x/j ; 7 j/sem ; jusqu'au sevrage. <i>Progression</i> : ajout de 10 % de la $P_{i_{max}}$ initiale/j. Supplémentation en O ₂ si nécessaire.
Condessa et al. (2013) [21]	Oui	Épreuve d'éveil quotidienne	KR + Mobilisations passives et actives	<i>Intensité</i> : 40 % $P_{i_{max}}$ <i>Modalité</i> : 5 séries ; 10 respirations. <i>Fréquence</i> : 2x/j ; 7 j/sem ; jusqu'au sevrage. <i>Progression</i> : ajout de 10 % de la $P_{i_{max}}$ initiale/j. Supplémentation en O ₂ si nécessaire.
Mohamed et al. (2014) [24]	Oui	Non documenté	KR + Mobilisations passives et actives	<i>Intensité</i> : 30 % $P_{i_{max}}$. <i>Modalité</i> : 5-6 séries ; 6 respirations ; repos entre sous VM entre les séries. <i>Fréquence</i> : 2x/j ; 12x/sem. <i>Progression</i> : +1-2 cmH ₂ O à chaque session. Supplémentation en O ₂ si nécessaire
Dixit et al. (2014) [25]	Non documenté	Non documenté	KR	<i>Intensité</i> : 30 % $P_{i_{max}}$. <i>Modalité</i> : 5 séries ; 6 respirations ; 1 min de repos sous VM entre les séries. <i>Fréquence</i> : 2x/j ; 7 j/sem ; jusqu'au sevrage. <i>Progression</i> : augmenté de 10 % de la $P_{i_{max}}$ chaque jour avec comme objectif une difficulté de 6-8/10
Ibrahiem et al. (2014) [26]	Oui	Non documenté	KR + Mobilisations passives et actives	<i>Intensité</i> : 30 % $P_{i_{max}}$. <i>Modalité</i> : 5-6 séries ; 6 respirations ; repos entre sous VM entre les séries. <i>Fréquence</i> : 2x/j ; 3j. <i>Progression</i> : +1-2 cmH ₂ O à chaque session. Supplémentation en O ₂ si nécessaire
Pascotini et al. (2014) [27]	Non documenté	Non documenté	KR + Mobilisations passives et actives	<i>Intensité</i> : 20 % $P_{i_{max}}$. <i>Modalité</i> : 3 séries ; 10 respirations ; 2 min de repos sous VM entre les séries. <i>Fréquence</i> : 1x/j ; 7j. <i>Progression</i> : non décrite.
Shimizu et al. (2014) [28]	Oui	Non documenté	Non documenté	<i>Intensité</i> : 50 % $P_{i_{max}}$. <i>Modalité</i> : 3 séries ; 10 respirations ; 1 min de repos sous VM entre les séries. <i>Fréquence</i> : 2x/j ; 4j. <i>Progression</i> : non.

KR : kinésithérapie respiratoire ; $P_{i_{max}}$: pression inspiratoire maximale.

$P_{i_{max}}$ mesurée est habituellement plus faible avec la fonction NIF malgré une occlusion maintenue 20 s. Cette différence s'explique par le fait que les mesures sont réalisées à des volumes pulmonaires liés à l'occlusion ou non de la valve expiratoire [34] (Fig. 1).

EMI par valve à seuil

L'EMI par valve à seuil est la technique la plus décrite dans la littérature [23]. Elle est cependant l'une des moins pratiquées [30]. Le Tableau 1 résume les différents protocoles d'entraînement retrouvés dans la littérature scientifique. La plupart des équipes installent confortablement le patient à 45° de proclive. Des critères d'initiation et d'arrêt de la séance sont définis et permettent de garantir la sécurité du patient [23] (Tableau 2).

Toutefois, les études n'associent pas toujours l'EMI à des protocoles de sevrage, de sédation ou de réhabilitation précoce reconnus pour influencer de façon positive la durée de sevrage [35-37]. Ainsi, l'EMI doit s'intégrer à la prise en charge individualisée du patient [30].

EMI en ajustant la sensibilité du trigger inspiratoire du ventilateur

Cette technique d'entraînement, initialement évaluée par Caruso et al., ne semble pas apporter de bénéfice sur la $P_{i_{max}}$ ni sur les autres critères d'évaluation. L'une des explications de son inefficacité pourrait être que l'entraînement proposé est insuffisant (intensité initiale, faible durée d'entraînement). De plus, en utilisant le trigger inspiratoire du ventilateur, la charge de travail n'est imposée qu'à l'ouverture de la valve inspiratoire, soit pour une courte partie du temps inspiratoire. Cependant, le travail d'Elbouhy et al.

[29], utilisant un protocole tout à fait similaire, retrouve une amélioration significative du taux de sevrage, de la durée de VM et des durées de séjour en réanimation et à l'hôpital. Ces résultats vont donc au-delà d'une simple augmentation de $P_{i_{max}}$ et pourraient permettre d'affiner la pratique de l'EMI en réanimation. En effet, cette approche peut être mise en place de façon très précoce, alors même que le patient est encore sédaté. Ainsi, l'entraînement pourrait être initié dans les premiers jours de l'hospitalisation grâce au ventilateur, puis poursuivi par un entraînement avec valve à seuil lorsque le niveau de sédation permet la participation du patient (Fig. 2).

L'EMI, stop ou encore ?

Une récente revue de littérature concernant le rôle du kinésithérapeute autour de l'extubation s'est intéressée à l'EMI [38]. Dans leurs conclusions, les auteurs invalident l'EMI (grade A) dans la mesure où cette technique n'aurait d'autre bénéfice que le gain de $P_{i_{max}}$. Néanmoins, l'une des limites de ce travail évoquée par les auteurs est que la recherche bibliographique a intégré un très grand nombre de références et manque donc de spécificité. En effet, le domaine de recherche sur le rôle du kinésithérapeute dans le succès de l'extubation est très vaste, du fait du nombre de techniques évaluées autour de l'extubation. Aussi, les bases de données explorées étaient différentes de celles d'Elkins et al. et le nombre d'études identifiées différait (4 vs 10 [respectivement [38] et [23]]). À la lumière de cette dernière méta-analyse, les conclusions autour de l'EMI pourraient être rediscutées, dans la mesure où cette approche a aujourd'hui montré des bénéfices cliniques et mérite sa place dans l'arsenal thérapeutique du kinésithérapeute.

Néanmoins, plusieurs zones d'ombre persistent. Il semble donc important de poursuivre les recherches afin de déterminer les modalités d'entraînement optimales, qui pourraient peut-être associer un entraînement précoce sur ventilateur et par valve à seuil dès que la participation devient possible. D'autre part, les résultats de l'EMI sur le sevrage et la durée de ventilation dépendent aussi probablement des « soins standard » pratiqués dans le service (protocole de sevrage, de sédation, programme de réhabilitation précoce), qui y sont associés et restent peu décrits dans la littérature. En effet, l'EMI ne concerne probablement pas tous les patients et les soins qui y sont adjoints doivent influencer le jugement clinique du thérapeute afin d'identifier les patients les plus susceptibles de bénéficier de cette technique. Une catégorie de patients semble toutefois de plus en plus mise en avant : ceux en échec de sevrage [23].

Enfin, une altération de la force et de l'endurance des muscles inspirateurs perdure même pour les patients ayant réussi leur sevrage de la VM et nous ne connaissons pas

Tableau 2 Critères d'arrêt des séances d'EMI [11,14,16, 19,22,37]

FC > 140 bpm ou augmentation de la FC > 20 % ;
FR > 40 cpm ;
SpO ₂ < 90 % pendant plus de 1 min ;
PAS > 180 mmHg ou < 90 mHg ou variation supérieure à 20 % ;
Respiration paradoxale ;
Agitation ;
Signes d'hypoxie ou d'hypercapnie ;
Somnolence ;
Arythmie ;
Apnée supérieure à 10s sur impossibilité d'ouvrir la valve (contrôle visuel et auditif) ;
Demande d'arrêt du patient.

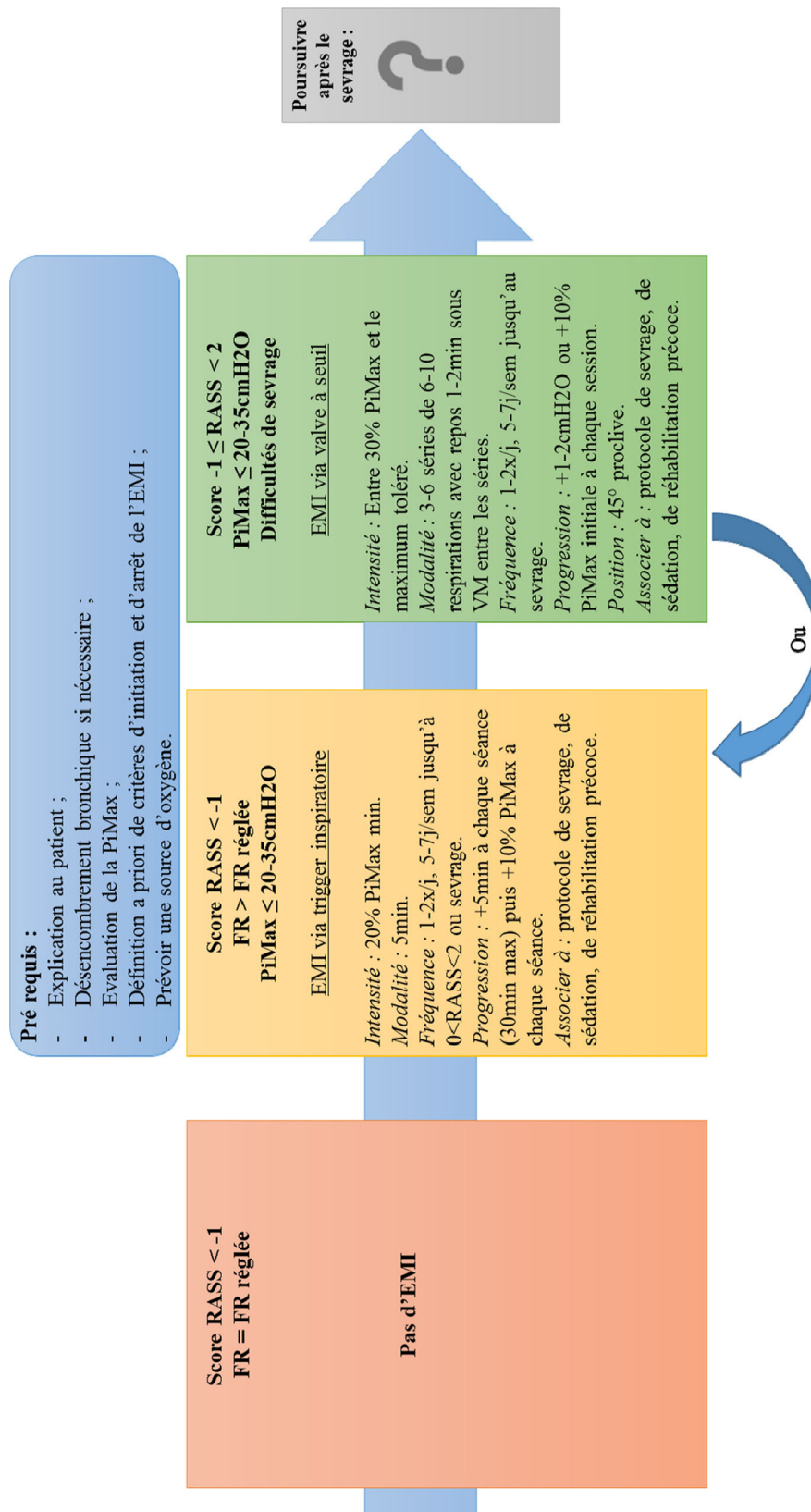


Fig. 2 Proposition d'un protocole d'EMI associant modification de la sensibilité du trigger inspiratoire et entraînement par valve à seuil chez un patient ventilé mécaniquement. RASS : *Richmond agitation sedation scale* ; EMI : entraînement des muscles inspirateurs

encore les répercussions cliniques de la DDIVM sur le long cours [39,40]. La poursuite de l'EMI en post-extubation reste donc une aire de recherche.

Conclusion

En conclusion, la faiblesse des muscles inspireurs est un facteur de risque d'échec de sevrage chez les patients sous VM prolongée. L'EMI permet de lutter contre le déséquilibre qui s'installe entre la capacité des muscles inspireurs et la charge de travail qui leur est imposée. Les dernières données de la littérature incitent à intégrer l'EMI dans la réhabilitation précoce, aujourd'hui incontournable en service de réanimation, en particulier chez les patients présentant un risque d'échec de sevrage. La synthèse des programmes évalués, associée à des critères d'initiation et d'arrêt stricts, permettrait la diffusion d'une pratique fiable et sûre en réanimation. Les catégories de patients à cibler restent à identifier mais ceux en échec de sevrage semblent tirer le plus de bénéfices de cette technique, dont l'intérêt au décours du sevrage de la VM et sur le long terme n'a pas encore été évalué.

Liens d'intérêts : Les auteurs déclarent ne pas avoir de lien d'intérêt.

Références

1. Société de réanimation de la langue française (SRLF) La réanimation en France - organisation et structures [En ligne] 2011. Disponible sur : <http://www.srlf.org/grandpublic/organisationss-structures/index.phtml>
2. Boles JM, Bion J, Connors A, et al (2007) Weaning from mechanical ventilation. *Eur Respir J* 29:1033–56
3. Vassilakopoulos T, Petrof BJ (2004) Ventilator-induced diaphragmatic dysfunction. *Am J Respir Crit Care Med* 169:336–41
4. Powers SK, Kavazis AN, Levine S (2009) Prolonged mechanical ventilation alters diaphragmatic structure and function. *Critical Care Medicine* 37:S347–53
5. Jaber S, Jung B, Matecki S, et al (2011) Clinical review: ventilator-induced diaphragmatic dysfunction—human studies confirm animal model findings! *Crit Care* 15:206
6. Hermans G, Agten A, Testelmans D, et al (2010) Increased duration of mechanical ventilation is associated with decreased diaphragmatic force: a prospective observational study. *Crit Care* 14:R127
7. Levine S, Nguyen T, Taylor N, et al (2008) Rapid disuse atrophy of diaphragm fibers in mechanically ventilated humans. *New Engl J Med* 358:1327–35
8. Jaber S, Petrof BJ, Jung B, et al (2011) Rapidly progressive diaphragmatic weakness and injury during mechanical ventilation in humans. *Am J Respir Crit Care Med* 183:364–71
9. Demoule A, Jung B, Prodanovic H, et al (2013) Diaphragm dysfunction on admission to the intensive care unit. Prevalence, risk factors, and prognostic impact—a prospective study. *Am J Respir Crit Care Med* 188:213–9
10. Supinski GS, Callahan LA (2013) Diaphragm weakness in mechanically ventilated critically ill patients. *Crit Care* 17:R120
11. Bissett B, Leditschke IA, Green M (2012) Specific inspiratory muscle training is safe in selected patients who are ventilator-dependent: a case series. *Intensive Crit Care Nurs* 28:98–104
12. DeJonghe B, Bastuji-Garin S, Durand MC, et al (2007) Respiratory weakness is associated with limb weakness and delayed weaning in critical illness. *Crit Care Med* 35:2007–15
13. Bonnevie T (2013) Entraînement en force des muscles inspireurs du patient ventilé – de la dysfonction diaphragmatique au sevrage de la ventilation mécanique. *Réanimation* 22:439–46
14. Gosselink R, Bott J, Johnson M, et al (2008) Physiotherapy for adult patients with critical illness: recommendations of the European Respiratory Society and European Society of Intensive Care Medicine Task Force on Physiotherapy for Critically Ill Patients. *Intensive Care Med* 34:1188–99
15. Martin AD, Davenport PD, Franceschi AC, et al (2002) Use of inspiratory muscle strength training to facilitate ventilator weaning: a serie of 10 consecutive patients. *Chest* 122:192–6
16. Martin AD, Smith BK, Davenport PD, et al (2011) Inspiratory muscle strength training improves weaning outcome in failure to wean patients: a randomized trial. *Crit Care* 15:R84
17. Sprague SS, Hopkins PD (2003) Use of inspiratory strength training to wean six patients who were ventilator-dependent. *Physical Therapy* 83:171–81
18. Moodie L, Reeve J, Elkins M (2011) Inspiratory muscle training increases inspiratory muscle strength in patients weaning from mechanical ventilation: a systematic review. *J Physiother* 57:213–21
19. Cader SA, Vale RG, Castro JC, et al (2010) Inspiratory muscle training improves maximal inspiratory pressure and may assist weaning in older intubated patients: a randomised trial. *J Physiother* 56:171–7
20. Caruso P, Denari SD, Ruiz SA, et al (2005) Inspiratory muscle training is ineffective in mechanically ventilated critically ill patients. *Clinics* 60:479–84
21. Condessa RL, Brauner JS, Saul AL, et al (2013) Inspiratory muscle training did not accelerate weaning from mechanical ventilation but did improve tidal volume and maximal respiratory pressures: a randomised trial. *J Physiother* 59:101–7
22. Cader SA, De Souza Vale RG, Zamora VE, et al (2012) Extubation process in bed-ridden elderly intensive care patients receiving inspiratory muscle training: a randomized clinical trial. *Clinical Interventions In Aging* 7:437–43
23. Elkins M, Dentice R (2015) Inspiratory muscle training facilitates weaning from mechanical ventilation among patients in the intensive care unit: a systematic review. *J Physiotherapy* 61:125–34
24. Mohamed AR, Elbasiouny HS, Salem NM (2014) Response of mechanically ventilated respiratory failure patients to respiratory muscles training. *Med J Cairo Univ* 82:19–24
25. Dixit A, Shashwat P (2014) Effects of threshold inspiratory muscle training versus conventional physiotherapy on the weaning period of mechanically ventilated patients: a comparative study. *Int J Physiother Res* 2:424–8
26. Ibrahim AA, Mohamed AR, Elbasiouny HS (2014) Effect of respiratory muscle training in addition to standard chest physiotherapy on mechanically ventilated patients. *J Med Res Pract* 3:52–8
27. Pascotini FS, Denardi C, Nunes GO (2014) Respiratory muscle training in patients weaning from mechanical ventilation. *ABCS Health Sci* 39:12–6
28. Shimuzu JA, Manzano RM, Quitério RJ, et al (2014) Determinant factors for mortality of patients receiving mechanical ventilation and effects of a protocole muscle training in weaning. *MTP & Rehab Journal* 12:136–42
29. Elbouhy MS, AbdelHalim HA, Hashem AM (2014) Effect of respiratory muscles training in weaning of mechanically ventilated COPD patients. *Egypt J Chest Dis Tubercul* 63:679–87

30. Bonnevie T, Villiot-Danger JC, Gravier FE, et al (2015) Inspiratory muscle training is used in some intensive care units, but many training methods have uncertain efficacy: a survey of French physiotherapists. *J Physiother* 61:204–9
31. Paiva DN, Assmann LB, Bordin DF, et al (2014) Inspiratory muscle training with threshold or incentive spirometry: Which is the most effective? *Revista Portuguesa De Pneumologia* 21:76–81
32. Caruso P, Friedrich C, Denari SD, et al (1999) The unidirectional valve is the best method to determine maximal inspiratory pressure during weaning. *Chest* 115:1096–101
33. Demoule A (2005) Exploration de la fonction des muscles respiratoires en réanimation. *Rev Mal Respir* 22:S86–S99
34. Spadaro S, Marangoni E, Ragazzi R, et al (2014) A methodological approach for determination of maximal inspiratory pressure in patients undergoing invasive mechanical ventilation. *Minerva Anestesiologica* 81:33–8
35. Blackwood B, Alderdice F, Burns K, et al (2011) Use of weaning protocols for reducing duration of mechanical ventilation in critically ill adult patients: Cochrane systematic review and meta-analysis. *BMJ* 342:c7237
36. De Wit M, Gennings C, Jenvey WI, et al (2008) Randomized trial comparing daily interruption of sedation and nursing-implemented sedation algorithm in medical intensive care unit patients. *Crit Care* 12:R70
37. Schweickert WD, Pohlman MC, Pohlman AS, et al (2009) Early physical and occupational therapy in mechanically ventilated, critically ill patients: a randomised controlled trial. *Lancet* 373:1874–82
38. Freynet A, Gobaille G, Dewilde C, et al (2015) Rôle du kinésithérapeute dans le succès de l'extubation: une revue de la littérature. *Réanimation* 24:452–64
39. Chang AT, Boots RJ, Brown MG, et al (2005) Reduced inspiratory muscle endurance following successful weaning from prolonged mechanical ventilation. *Chest* 128:553–59
40. Adler D, Dupuis-Lozeron E, Richard JC, et al (2014) Does inspiratory muscle dysfunction predict readmission after intensive care unit discharge? *American Journal Of Respiratory And Crit Care Med* 190:347–50