

## Évaluation de la force des muscles respiratoires : données récentes (1998-2004)

A. Demoule, T. Similowski

L'exploration fonctionnelle des muscles respiratoires a récemment fait l'objet d'un document conjoint de l'*American Thoracic Society* (ATS) et l'*European Respiratory Society* (ERS). Ce document, publié dans sa version originale en 2002 [1], a été traduit en français sous l'égide de la *Revue des Maladies Respiratoires* [2].

Le second chapitre de ce document était consacré à l'évaluation de la force des muscles respiratoires. La plupart des références bibliographiques citées dans ce chapitre étant antérieures à 1998, le Comité de Rédaction de la *Revue des Maladies Respiratoires* et le groupe « Muscles Respiratoires » de la Société de Pneumologie de Langue Française ont décidé de publier une série de mises à jour, correspondant aux différents chapitres du document. Le présent article résume les principes généraux d'exploration de la force des muscles respiratoires puis se donne pour objectif de mettre en lumière les plus marquantes des données publiées depuis 1998. Notons par ailleurs qu'une revue des applications cliniques de ces techniques d'exploration a récemment fait l'objet d'une publication [3].

### Principes généraux de l'évaluation de la force des muscles respiratoires

Les explorations permettant d'évaluer la force des muscles respiratoires reposent sur la mesure de pressions. Ces pressions sont mesurées dans deux situations bien distinctes : lors de manœuvres volontaires ou en réponse à des stimulations. Les premières ont comme principal avantage de ne pas nécessiter d'équipement complexe. En revanche, elles nécessitent une étroite collaboration du sujet, ce qui n'est pas toujours sans difficulté. À l'inverse, la mesure des pressions en réponse à des stimulations nécessite un équipement plus important, mais ne nécessite pas l'étroite collaboration du sujet.

### Manœuvres volontaires

Bien que de façon générale les patients réalisent aisément ces explorations, cela n'est pas toujours le cas. Il est

Service de Pneumologie et Réanimation, Groupe Hospitalier Pitié-Salpêtrière, Assistance Publique – Hôpitaux de Paris. UPRES EA 2397, Université Pierre et Marie Curie Paris VI, Paris, France.

**Correspondance** : T. Similowski  
Service de Pneumologie et Réanimation, Groupe Hospitalier Pitié-Salpêtrière 47/83, boulevard de l'Hôpital, 75651 Paris Cedex 13.  
thomas.similowski@psl.ap-hop-paris.fr

Réception version princeps à la Revue : 30.08.2004.  
Retour aux auteurs pour révision : 27.09.2004.  
Réception 1<sup>ère</sup> version révisée : 30.09.2003.  
Acceptation définitive : 01.10.2004.

alors difficile d'être certain que l'effort a été maximum, ce qui peut compliquer l'interprétation des valeurs basses. En d'autres termes : la valeur basse est-elle liée à une réelle diminution de la pression maximale que produisent les muscles respiratoires ou est-elle en rapport avec effort volontaire insuffisant ?

### Pressions statiques inspiratoires et expiratoires maximales

Les pressions statiques inspiratoires ( $P_{I_{max}}$ ) et expiratoires ( $P_{E_{max}}$ ) maximales sont des mesures cliniques simples qui, de ce fait, sont communément utilisées dans les services d'explorations fonctionnelles respiratoires. De plus, le fait que des valeurs normales soient disponibles les rend particulièrement intéressantes. Néanmoins, elles nécessitent la coordination de différents groupes musculaires et certains sujets peuvent avoir du mal à réaliser ces manœuvres maximales, rendant dès lors problématique l'interprétation de valeurs basses. Comme elles impliquent la coordination de plusieurs groupes musculaires, ces valeurs sont intégratives et ne permettent pas d'approcher la force d'un muscle respiratoire donné. Si le clinicien souhaite obtenir des informations spécifiques à la force du diaphragme, il doit alors avoir recours à la mesure de la pression statique trans-diaphragmatique maximale. Toutefois, cette mesure est par essence invasive puisqu'elle nécessite l'introduction de ballon-cathéters œsophagien et gastrique et la manœuvre peut être en elle-même très difficiles à réaliser. De plus, les valeurs normales sont très dispersées. Son utilisation en pratique clinique est donc limitée.

### Reniflement maximal

Les efforts de reniflement maximal (sniffs) ont comme principal avantage de pouvoir être réalisés par des patients peu entraînés. De plus, les pressions développées lors des sniffs sont reproductibles et leur gamme de valeur normale est plus étroite que celle des pressions statiques maximales ou de la pression statique trans-diaphragmatique maximale. Lors d'un sniff, la pression œsophagienne permet l'étude de la force globale des muscles inspiratoires, tandis que la pression trans-diaphragmatique est une mesure plus spécifique de la force du diaphragme. La mesure de la pression nasale lors du sniff est un outil utile et non invasif de mesure de la force inspiratoire, validé chez les patients atteints de pathologies neuromusculaires.

### Pression maximale à la toux

La mesure de la pression gastrique lors d'efforts maximaux de toux permet d'évaluer la force des muscles abdominaux. Cette mesure peut utilement compléter  $P_{E_{max}}$  et ce tout particulièrement chez les patients incapables de réaliser correctement des manœuvres de  $P_{E_{max}}$ . Toutefois, il n'existe que peu de données sur les valeurs normales correspondantes.

### Tests non volontaires de la force des muscles respiratoires

Ces explorations reposent toutes sur le même principe : mesurer la pression que produit un muscle en réponse à la stimulation d'un nerf qui lui est efférent.

#### Stimulation phrénique

La stimulation phrénique permet de mesurer de façon spécifique la pression que produit le diaphragme. Il existe deux modalités distinctes de stimulation des nerfs phréniques : la stimulation électrique et les stimulations magnétiques. Ces deux techniques nécessitent deux types d'appareillages bien différents.

La stimulation électrique des nerfs phréniques a comme principal avantage d'activer le diaphragme de façon sélective. Néanmoins, elle demande beaucoup d'adresse et n'est donc pas toujours de réalisation facile. De plus, elle peut être inconfortable pour le patient et difficile à réaliser dans certains environnements (en réanimation par exemple). En revanche, la stimulation magnétique est techniquement plus aisée pour l'opérateur, mais elle stimule les nerfs phréniques de façon moins sélective. Sa tolérance varie d'un patient à l'autre. La stimulation magnétique peut être réalisée de plusieurs façons : cervicale, antéro-latérale et antérieure.

- La stimulation magnétique cervicale provoque une contraction diaphragmatique bilatérale. Elle est moins spécifique que la stimulation électrique car elle co-active des muscles innervés par le plexus brachial. Il peut parfois s'avérer difficile d'obtenir et de confirmer une stimulation supra-maximale, ainsi que d'enregistrer un EMG de qualité satisfaisante.

- La stimulation magnétique focale antéro-latérale est plus spécifique et peut donner des résultats similaires à ceux de la stimulation électrique. Utilisée de façon unilatérale, cette stimulation peut permettre d'étudier la fonction d'un seul des deux hémidiaphragmes. Utilisée de façon bilatérale, elle peut permettre d'obtenir de façon fiable une contraction diaphragmatique supra-maximale.

- La stimulation magnétique antérieure présente les mêmes inconvénients que la stimulation magnétique cervicale, mais elle peut s'avérer utile dans certains cas, comme chez les patients de réanimation.

Quelle que soit la technique de stimulation choisie, électrique ou magnétique, l'évaluation de la force des muscles respiratoires implique de mesurer la pression qu'ils développent en réponse à cette stimulation. La mesure de la pression buccale en réponse à la stimulation phrénique ( $P_m$ ,  $tw$ ) permet une approche non invasive de la force du diaphragme. Toutefois, chez les patients ayant une obstruction des voies aériennes et quand il y a une fermeture de la glotte ou une instabilité des voies aériennes supérieures, la transmission de la pression alvéolaire à la bouche peut s'avérer inadéquate, ce qui pose un problème pratique et en limite l'application clinique. La mesure de la pression œsophagienne permet de s'affranchir des problèmes de conduction relatifs aux voies

aériennes supérieures, mais nécessite la mise en place d'un ballon-cathéter œsophagien, ce qui n'est pas sans inconvénients pour le patient. Enfin, la mesure de la pression transdiaphragmatique en réponse à une stimulation phrénique bilatérale (Pdi, tw) fournit un index spécifique de la force du diaphragme et l'on dispose de valeurs normales. La Pdi, tw est utile en pratique clinique, mais reste invasive.

### **Stimulation abdominale**

La mesure de la pression gastrique en réponse à une stimulation magnétique réalisée en regard des 8<sup>e</sup> à 10<sup>e</sup> vertèbres thoraciques fournit un index clinique de la fonction des muscles abdominaux. On manque toutefois de données normales.

## **Matériel nécessaire à la mesure des pressions**

### **Contre-indications et risques inhérents à la pose de ballon-cathéters œsophagiens et gastriques**

Bien qu'aucune publication nouvelle ne soit à signaler dans ce domaine, nous insistons ici sur les contre-indications et les risques de la pose de ballon-cathéters œsophagiens et gastriques. En effet, comparé à d'autres procédures médicales, l'inconfort associé à la déglutition d'une sonde fine est faible et il est de ce fait difficile de qualifier ce geste « d'invasif » ou de « traumatique ». Il convient néanmoins d'être particulièrement prudent dans un certain nombre de cas. Ainsi, il existe chez les patients ayant des troubles de déglutition un risque de fausse route qui peut amener le ballonnet en position intra-trachéale. Il convient donc de faire particulièrement attention chez ces patients, tout comme chez les patients porteurs de maladies œsophagiennes ou d'anomalies au niveau du sphincter gastro-œsophagien. La pose du ballonnet n'est pas totalement atraumatique et s'accompagne volontiers de lésions minimales de la muqueuse nasale et naso-pharyngée. Il convient donc d'être très prudent lors de l'insertion d'un tel dispositif chez les patients porteurs de troubles de l'hémostasie. Une lubrification abondante du ballonnet et la contre-indication de ce geste chez les patients présentant un risque hémorragique important devraient permettre de prévenir la survenue de complications hémorragiques majeures. Enfin, les ballons sont en général composés de latex, il convient donc de contre-indiquer leur utilisation chez les patients souffrant d'une allergie au latex.

### **La sonde urinaire et le cathéter veineux central : une alternative aux ballon-cathéters œsophagiens et gastriques chez les patients de réanimations**

Chievely-Williams et coll. [4] ont comparé, lors d'une réduction progressive du niveau d'aide inspiratoire, les variations de la pression veineuse centrale (mesurée au moyen d'un cathéter veineux central) et de la pression intra vésicale à celles

des pressions œsophagienne et gastrique. Ils ont montré que les variations des pressions veineuses centrales et vésicales étaient respectivement corrélées à celles des pressions œsophagiennes et gastriques. De plus, la différence entre les pressions veineuses centrale et intra vésicale était corrélée à la pression transdiaphragmatique. Les auteurs concluaient donc que, dans certaines situations et à certaines conditions, la mesure simultanée de la pression veineuse centrale et de la pression vésicale pouvait approcher la mesure de la pression transdiaphragmatique.

### **Un nouveau dispositif pour la mesure de la pression nasale**

Il est parfois difficile de concevoir des systèmes permettant le recueil de la pression nasale. Ceux-ci sont souvent artisanaux et les fuites sont un souci permanent. Normand et coll. ont évalué la qualité de la mesure de la pression nasale lors du sniff au moyen d'une sonde urinaire introduite dans la narine [5]. Leurs résultats montraient que ce type de dispositif, disponible dans le commerce et peu coûteux, était à même de permettre une mesure fiable de la pression nasale lors des manœuvres de reniflement maximal.

Mesure des pressions maximales inspiratoires et expiratoires au travers d'un masque facial

Les pressions maximales tout comme la spirométrie sont habituellement mesurées au travers d'une pièce buccale. L'existence de fuites est un des problèmes majeurs de ce type d'interface. Or, l'existence d'un déficit musculaire facial ou buccal rend ces fuites extrêmement fréquentes chez les patients atteints de pathologies neuro-musculaires. Vohlge-muth et coll. ont proposé l'utilisation d'un masque facial comme interface entre le patient et le capteur de pression [6]. Ils ont comparé ce masque facial à la pièce buccale chez 22 sujets sains. Les premiers résultats montraient qu'avec le masque facial, la capacité vitale et le VEMS étaient de 200 ml inférieurs à ce qui était mesuré lorsque l'interface était une pièce buccale et la pression expiratoire maximale de 32 cm H<sub>2</sub>O inférieure. Les auteurs se sont alors attachés à établir des normes en se basant sur des mesures réalisées chez 252 sujets sains. Le masque facial pourrait donc s'avérer être une interface alternative à la traditionnelle pièce buccale, tout particulièrement intéressante chez les patients atteints de pathologies neuro-musculaires [6].

## **Étude de la force des muscles respiratoires par les manœuvres volontaires**

### **Pression maximale statique inspiratoire**

Le second chapitre du document commun ATS-ERS a largement insisté sur une des principales limitations de la mesure des pressions inspiratoire et expiratoire : la difficulté à interpréter des valeurs basses. Smeltzer et coll. [7] ont évalué,

lors de quatre sessions distinctes, la reproductibilité de ces mesures chez des patients atteints de sclérose en plaque et chez des sujets sains. Leurs résultats montraient que les valeurs de  $P_{\text{Imax}}$  et  $P_{\text{Emax}}$  obtenues chez les patients atteints de sclérose en plaque variaient au cours des trois premières sessions. De plus, au sein même de la première session, ces valeurs augmentaient progressivement au fur et à mesure des essais. D'aussi larges variations n'étaient pas retrouvées chez les sujets sains. Ces résultats suggèrent donc que même si les valeurs des pressions maximales sont reproductibles chez les sujets sains, elles ne le sont pas toujours chez les patients. De plus, tout patient devant réaliser ces tests devrait bénéficier d'un entraînement préalable.

### Reniflements maximaux (Sniff test)

Les efforts de reniflement maximal (sniffs) ont comme avantage de pouvoir être réalisés par des patients peu entraînés et les pressions développées lors des sniffs sont relativement reproductibles. La mesure de la pression nasale ( $P_{\text{nas}}$ , sniff) est probablement le moyen le moins invasif de recueillir les pressions produites par des sniffs. Stefanutti et coll. [8] ont évalué la faisabilité de cette mesure chez 126 patients atteints de pathologies neuro-musculaires et l'on a comparé à la  $P_{\text{Imax}}$ . Leurs résultats montraient que la  $P_{\text{nas}}$ , sniff pouvait être mesurée chez tous les patients, ce qui n'était pas le cas de la  $P_{\text{Imax}}$ . Lorsqu'elle est exprimée en pourcentage de la valeur prédite, la  $P_{\text{nas}}$ , sniff n'était pas différente de la  $P_{\text{Imax}}$ . Enfin et surtout, la  $P_{\text{nas}}$ , sniff s'avérait être le déterminant majeur de la capacité vitale. Cette association entre faisabilité et sensibilité de la  $P_{\text{nas}}$ , sniff a aussi été retrouvée chez les patients atteints de sclérose latérale amyotrophique [9]. Néanmoins, Hart et coll. [10], qui ont mesuré la  $P_{\text{nas}}$ , sniff chez 248 patients atteints de pathologies neuro-musculaires ont observé que cette valeur était bien souvent inférieure à la  $P_{\text{Imax}}$ . Ils concluaient donc que, chez ces patients, il était préférable de combiner ces deux explorations plutôt que de se limiter à la seule mesure de  $P_{\text{nas}}$ , sniff. Une alternative, toute aussi peu invasive, est la mesure de la pression buccale lors du sniff ( $P_{\text{m}}$ , sniff). Landelli et coll. [11] ont mesuré la  $P_{\text{m}}$ , sniff et l'ont comparé à la  $P_{\text{Imax}}$  chez 30 patients atteints de pathologies neurologiques ou neuromusculaires. Leurs résultats montraient que la  $P_{\text{m}}$ , sniff tendait à être inférieure à la  $P_{\text{Imax}}$ . Ils concluaient donc que la  $P_{\text{m}}$ , sniff ne pouvait se substituer à la  $P_{\text{Imax}}$ , mais que, au contraire, ces deux explorations devaient être complémentaires. En effet, chez les patients présentant une diminution de  $P_{\text{Imax}}$ , un rapport  $P_{\text{m}}$ , sniff/ $P_{\text{Imax}}$  en deçà des valeurs normales confirmait la dysfonction des muscles respiratoires. Cette notion d'explorations complémentaires revient dans une autre étude dans laquelle les auteurs ont mesuré chez des patients atteints de pathologies neuromusculaires la  $P_{\text{nas}}$ , sniff et la pression buccale en réponse à une stimulation des nerfs phréniques [12]. Là encore, c'est la combinaison des deux techniques dont, soulignons-le, aucune n'est invasive, qui permet de discriminer au mieux les patients souffrant d'un déficit des muscles inspiratoires. Plus invasive,

la pression oesophagienne mesurée lors du sniff ( $P_{\text{es}}$ , sniff) semble être un indice nettement plus robuste. C'est ce qu'ont montré Verin et coll. [13] chez 10 sujets sains chez lesquels ont été recueillies simultanément lors de sniff la pression oesophagienne et la pression gastrique, la différence des deux donnant accès à la pression transdiaphragmatique. Ces sujets ont réalisé des sniffs « libres » et des sniff au cours desquels étaient préférentiellement activés le diaphragme ou les muscles inspiratoires extradiaphragmatiques. Leurs résultats montraient que  $P_{\text{es}}$ , sniff n'était pas affectée par la nature du sniff, mais ne reflétait pas de façon précise la pression transdiaphragmatique. La  $P_{\text{es}}$ , sniff est donc un indice robuste de la force globale des muscles inspiratoires. Lors d'un sniff, l'approche spécifique de la fonction diaphragmatique repose donc sur la mesure de la pression transdiaphragmatique. Néanmoins, comme l'ont montré Luo et coll. [14], cette pression reste variable d'un sujet à l'autre.

### Pression expiratoire

L'exploration de la fonction des muscles inspiratoires par la mesure des pressions qu'ils sont susceptibles de produire se heurte bien souvent aux mêmes contraintes que l'exploration de la fonction des muscles inspiratoires. Ainsi, comme mentionné précédemment, la  $P_{\text{Emax}}$  recueillie chez les patients porteurs d'affections neuromusculaires est relativement variable et il est préférable d'entraîner les patients avant de leur faire réaliser de telles explorations [7]. La mesure de la pression gastrique lors des efforts de toux est probablement l'une des mesures les plus fiables de la fonction des muscles expiratoires. Man et coll. [15] l'ont comparé à la  $P_{\text{Emax}}$  chez 293 patients adressés pour exploration fonctionnelle des muscles respiratoires. Ils ont observé que parmi les 171 patients qui avaient une  $P_{\text{Emax}}$  basse, 42 % avaient une pression gastrique normale lors des efforts de toux. En revanche, chez les 105 patients qui avaient une pression gastrique diminuée lors des efforts de toux, seuls 5,7 % avaient une  $P_{\text{Emax}}$  diminuée. La mesure de la pression à la bouche lors d'une expiration forcée au travers d'un conduit hautement résistif pourrait aussi être une alternative non invasive intéressante [16]. Néanmoins, les pressions mesurées restent inférieures à celles que produisent des efforts de toux.

### Pressions obtenues en réponse à la stimulation phrénique

#### Contre-indications et précautions relatives à la stimulation magnétique

La plupart des données publiées depuis 1998 concernent la stimulation magnétique des nerfs phréniques. Le document ATS-ERS ne faisait pas mention des contre-indications de cette technique et il nous a paru important de les mentionner ici. De façon générale, les explorations impliquant un champ magnétique intense sont contre-indiquées chez les patients porteurs d'appareillages constitués de métaux ferreux ou de

dispositifs médicaux susceptibles d'être dérégés par les rayonnements électromagnétiques. En l'absence d'étude expérimentale, il conviendra donc de contre-indiquer la stimulation magnétique chez les patients porteurs de stimulateurs cardiaques. En effet, même si l'imagerie par résonance magnétique n'entraîne ni déplacement [17] ni dérèglement des stimulateurs cardiaques [18], ce type d'exploration implique généralement un champ magnétique d'environ 0,5 tesla, ce qui est inférieur aux 2,5 Tesla habituellement produits par les stimulateurs magnétiques. On contre-indiquera aussi la stimulation magnétique chez les patients porteurs de matériel chirurgical implanté dans la région cervicale si celui-ci est de nature ferreuse. Enfin, il est important de savoir que la stimulation magnétique n'est pas contre-indiquée chez les patients porteurs de stents intra-coronaires [19]. En ce qui concerne les conditions dans lesquelles doit être réalisé l'examen, on notera qu'un état post-prandial est susceptible d'influencer les résultats et qu'il est préférable de réaliser cet examen à jeun [20]. Notons que cela est d'autant plus préférable que le clinicien peut être conduit à poser des ballon-cathéters oesophagiens et gastriques. Enfin, les résultats d'une récente étude suggèrent que la pression transdiaphragmatique en réponse à la stimulation des nerfs phréniques est une grandeur peu variable au cours du temps chez un même individu [21].

### Spécificités de la stimulation magnétique cervicale

Alors que la stimulation électrique provoque la contraction du diaphragme par la stimulation des racines cervicales du nerf phrénique, il est maintenant admis que la stimulation magnétique cervicale, par le champ magnétique produit en C7, atteints les nerfs phréniques dans leur portion antérieure et ce à travers le cou. Elle stimule donc le tronc du nerf phrénique en un point plus distal que ce n'est le cas en stimulation électrique [22, 23]. La stimulation magnétique cervicale n'étant pas sélective des nerfs phréniques, elle co-active un certain nombre de racines cervicales, entraînant par là même la contraction d'autres muscles que le diaphragme. La pression produite en réponse à ces types de stimulation peut donc ne pas être totalement imputable au diaphragme et être produite par d'autres groupes musculaires, comme les muscles du cou. C'est ce qu'ont montré Attali et coll. [24] chez des patients atteints de sclérose latérale amyotrophique, tous porteurs d'une hypertrophie associée à une hyperactivité compensatoire des muscles du cou. Chez aucun de ces patients la stimulation magnétique cervicale ne s'est accompagnée d'une réponse électromyographique du diaphragme ; elle s'accompagnait constamment d'une dépression abdominale. En revanche, la stimulation produisait une dépression buccale d'en moyenne 2,6 cmH<sub>2</sub>O. Ce facteur confondant doit donc être pris en compte chez les patients porteurs d'une dysfonction diaphragmatique chronique. Cette co-activation des muscles de la cage thoracique extra-diaphragmatiques peut aussi être mise à profit. Similowski et coll. [25] ont ainsi montré que les variations de pression diaphragmatique mesu-

rée en réponse à des stimulations magnétiques cervicales et électriques étaient différentes lors d'une épreuve de fatigue sélective du diaphragme ou des muscles inspiratoires extradiaphragmatiques. La stimulation magnétique cervicale pourrait donc permettre d'évaluer de façon spécifique la fatigue des muscles inspiratoires extradiaphragmatiques. Toujours sur le diagnostic de la fatigue des muscles respiratoires, Delpech et coll. [26] ont montré que la mesure de la pression buccale produite en réponse à une stimulation magnétique cervicale pouvait permettre à elle seule de diagnostiquer une fatigue des muscles respiratoires.

### Stimulation des nerfs phréniques en réanimation

L'exploration de la fonction des muscles respiratoires en réanimation fait l'objet d'un chapitre distinct. Nous ne mentionnerons donc ici que brièvement les récentes avancées dans le domaine de la stimulation des nerfs phréniques chez les patients de réanimation. Par son environnement, la réanimation complique de façon considérable la stimulation des nerfs phréniques. Dans ce contexte, la stimulation magnétique antérieure semble intéressante [27]. De plus, plusieurs travaux suggèrent que le recueil de la pression à l'orifice externe de la sonde de trachéotomie pourrait se substituer avantageusement à la mesure de la pression oesophagienne par ballon-cathéters [28-30].

En conclusion, l'évaluation de la force des muscles respiratoires par la quantification des pressions qu'ils sont susceptibles de produire fait appel à plusieurs types de mesures. Chacune de ces mesures a ses propres avantages et inconvénients et aucune n'est réellement supérieure aux autres. Bien au contraire, les travaux récents suggèrent qu'un diagnostic fiable résulte de la combinaison raisonnée de plusieurs de ces mesures. Aux mieux, cette combinaison pourrait s'articuler autour d'arbres décisionnels. Il s'avère par ailleurs nécessaire de disposer de normes validées dans les populations couramment étudiées.

### Références

- 1 American Thoracic Society/European Respiratory Society : ATS/ERS Statement on respiratory muscle testing. *Am J Respir Crit Care Med* 2002 ; 166 : 518-624.
- 2 <http://www.splf.org/rmr/accesLibre/MusclesRespiratoiresVF.htm>
- 3 Laghi F, Tobin MJ : Disorders of the respiratory muscles. *Am J Respir Crit Care Med* 2003 ; 168 : 10-48.
- 4 Chievey-Williams S, Dinner L, Puddicombe A, Field D, Lovell AT, Goldstone JC : Central venous and bladder pressure reflect transdiaphragmatic pressure during pressure support ventilation. *Chest* 2002 ; 121 : 533-8.
- 5 Normand H, Straus C, Morelot-Panzini C, Similowski T, Zelter M : Practical variant of the sniff nasal inspiratory pressure measurement. *Rev Mal Respir* 2001 ; 18 : 450-2.
- 6 Wohlgenuth M, van der Kooi EL, Hendriks JC, Padberg GW, Folgering HT : Face mask spirometry and respiratory pressures in normal subjects. *Eur Respir J* 2003 ; 22 : 1001-6.

- 7 Smeltzer SC, Lavietes MH : Reliability of maximal respiratory pressures in multiple sclerosis. *Chest* 1999 ; 115 : 1546-52.
- 8 Stefanutti D, Benoist MR, Scheinmann P, Chaussain M, Fitting JW : Usefulness of sniff nasal pressure in patients with neuromuscular or skeletal disorders. *Am J Respir Crit Care Med* 2000 ; 162 : 1507-11.
- 9 Fitting JW, Paillex R, Hirt L, Aebischer P, Schlupe M : Sniff nasal pressure: a sensitive respiratory test to assess progression of amyotrophic lateral sclerosis. *Ann Neurol* 1999 ; 46 : 887-93.
- 10 Hart N, Polkey MI, Sharshar T, Falaize L, Fauroux B, Raphael JC, Lofaso F : Limitations of sniff nasal pressure in patients with severe neuromuscular weakness. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 2003 ; 74 : 1685-7.
- 11 Iandelli I, Gorini M, Misuri G, Gigliotti F, Rosi E, Duranti R, Scano G : Assessing inspiratory muscle strength in patients with neurologic and neuromuscular diseases: comparative evaluation of two noninvasive techniques. *Chest* 2001 ; 119 : 1108-13.
- 12 Hughes PD, Polkey MI, Kyroussis D, Hamnegard CH, Moxham J, Green M : Measurement of sniff nasal and diaphragm twitch mouth pressure in patients. *Thorax* 1998 ; 53 : 96-100.
- 13 Verin E, Delafosse C, Straus C, Morelot-Panzini C, Avdeev S, Derenne JP, Similowski T : Effects of muscle group recruitment on sniff transdiaphragmatic pressure and its components. *Eur J Appl Physiol* 2001 ; 85 : 593-8.
- 14 Luo YM, Hart N, Mustafa N, Man WD, Rafferty GF, Polkey MI, Moxham J : Reproducibility of twitch and sniff transdiaphragmatic pressures. *Respir Physiol Neurobiol* 2002 ; 132 : 301-6.
- 15 Man WD, Kyroussis D, Fleming TA, Chetta A, Harraf F, Mustafa N, Rafferty GF, Polkey MI, Moxham J : Cough gastric pressure and maximum expiratory mouth pressure in humans. *Am J Respir Crit Care Med* 2003 ; 168 : 714-7.
- 16 Chetta A, Harris ML, Lyall RA, Rafferty GF, Polkey MI, Olivieri D, Moxham J : Whistle mouth pressure as test of expiratory muscle strength. *Eur Respir J* 2001 ; 17 : 688-95.
- 17 Sommer T, Vahlhaus C, Lauck G, von Smekal A, Reinke M, Hofer U, Block W, Traber F, Schneider C, Gieseke J, Jung W, Schild H : MR imaging and cardiac pacemakers: in-vitro evaluation and in-vivo studies in 51 patients at 0.5 T. *Radiology* 2000 ; 215 : 869-79.
- 18 Vahlhaus C, Sommer T, Lewalter T, Schimpf R, Schumacher B, Jung W, Luderitz B : Interference with cardiac pacemakers by magnetic resonance imaging: are there irreversible changes at 0.5 Tesla? *Pacing Clin Electrophysiol* 2001 ; 24 : 489-95.
- 19 Gerber TC, Fasseas P, Lennon RJ, Valeti VU, Wood CP, Breen JF, Berger PB : Clinical safety of magnetic resonance imaging early after coronary artery stent placement. *J Am Coll Cardiol* 2003 ; 42 : 1295-8.
- 20 Man WD, Luo YM, Mustafa N, Rafferty GF, Glerant JC, Polkey MI, Moxham J : Postprandial effects on twitch transdiaphragmatic pressure. *Eur Respir J* 2002 ; 20 : 577-80.
- 21 Criner GJ, Travaline JM, Holt GA, Bosse CG, Kelsen SG : Variability of electrophrenic diaphragm twitch stimulation over time in normal subjects. *Respir Physiol* 1999 ; 118 : 39-47.
- 22 Similowski T, Mehiri S, Duguet A, Attali V, Straus C, Derenne JP : Comparison of magnetic and electrical phrenic nerve stimulation in assessment of phrenic nerve conduction time. *J Appl Physiol* 1997 ; 82 : 1190-9.
- 23 Verin E, Straus C, Demoule A, Mialon P, Derenne JP, Similowski T : Validation of improved recording site to measure phrenic conduction from surface electrodes in humans. *J Appl Physiol* 2002 ; 92 : 967-74.
- 24 Attali V, Mehiri S, Straus C, Salachas F, Arnulf I, Meininger V, Derenne JP, Similowski T : Influence of neck muscles on mouth pressure response to cervical magnetic stimulation. *Am J Respir Crit Care Med* 1997 ; 156 : 509-14.
- 25 Similowski T, Straus C, Attali V, Duguet A, Derenne JP : Cervical magnetic stimulation as a method to discriminate between diaphragm and rib cage muscle fatigue. *J Appl Physiol* 1998 ; 84 : 1692-700.
- 26 Delpech N, Jonville S, Denjean A : Mouth pressure twitches induced by cervical magnetic stimulation to assess inspiratory muscle fatigue. *Respir Physiol Neurobiol* 2003 ; 134 : 231-7.
- 27 Polkey MI, Duguet A, Luo Y, Hughes PD, Hart N, Hamnegard CH, Green M, Similowski T, Moxham J : Anterior magnetic phrenic nerve stimulation: laboratory and clinical evaluation. *Intensive Care Med* 2000 ; 26 : 1065-75.
- 28 Watson AC, Hughes PD, Louise Harris M, Hart N, Ware RJ, Wendon J, Green M, Moxham J : Measurement of twitch transdiaphragmatic, esophageal, and endotracheal tube pressure with bilateral anterolateral magnetic phrenic nerve stimulation in patients in the intensive care unit. *Crit Care Med* 2001 ; 29 : 1325-31.
- 29 Mills GH, Ponte J, Hamnegard CH, Kyroussis D, Polkey MI, Moxham J, Green M : Tracheal tube pressure change during magnetic stimulation of the phrenic nerves as an indicator of diaphragm strength on the intensive care unit. *Br J Anaesth* 2001 ; 87 : 876-84.
- 30 Cattapan SE, Laghi F, Tobin MJ : Can diaphragmatic contractility be assessed by airway twitch pressure in mechanically ventilated patients? *Thorax* 2003 ; 58 : 58-62.