

Techniques électrophysiologiques d'évaluation fonctionnelle des muscles respiratoires : données récentes (1998-2004)

A. Demoule, T. Similowski

L'exploration fonctionnelle des muscles respiratoires a fait récemment 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 troisième chapitre de ce document était consacré aux techniques électrophysiologiques d'exploration fonctionnelle 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. L'objectif de la présente synthèse est double. Dans un premier temps, nous résumerons les principes généraux de l'exploration électrophysiologique des muscles respiratoires. Puis, dans un second temps, nous tenterons de souligner les plus marquantes des données publiées depuis 1998. Notons par ailleurs que des applications cliniques des différentes explorations présentées dans ce chapitre ont récemment fait l'objet d'une publication [3].

Principes généraux de l'exploration électrophysiologique des muscles respiratoires

L'exploration électrophysiologique des muscles respiratoires a pour principal objectif d'évaluer l'intégrité de l'appareil neuromusculaire respiratoire. Elle fait appel à des techniques complexes et demande une expérience considérable. Il existe deux grandes catégories d'explorations : l'électromyographie et les stimulations.

Électromyographie

L'électromyographie (EMG) permet d'étudier le profil et le niveau d'activation des muscles respiratoires et ce afin de

Service de Pneumologie et Réanimation, Groupe Hospitalier Pitié-Salpêtrière, Assistance Publique, Hôpitaux de Paris et 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^{ère} version révisée : 30.09.2004.
Acceptation définitive : 01.10.2004.

détecter et d'identifier un certain nombre de pathologies neuromusculaires. Combinées à des explorations de la fonction mécanique de ces muscles, elles peuvent évaluer la qualité du couplage électromécanique. L'EMG peut être enregistré au moyen d'électrodes de surface (diaphragme, intercostaux, scapulaires, abdominaux et muscles respiratoires accessoires comme les sterno-cléido-mastoïdiens), d'électrodes intramusculaires ou encore au moyen d'une électrode œsophagienne (diaphragme crural). Les électrodes de surface ont pour avantage d'être atraumatiques et d'échantillonner un grand nombre d'unités motrices. Néanmoins, le signal qu'elles recueillent peut être contaminé par l'activité électrique émanant d'autres muscles – respiratoires ou non respiratoires – ce qui est un problème non négligeable. De plus, la taille et la morphologie corporelle influencent toutes deux l'amplitude du signal. Les électrodes œsophagiennes fournissent quant à elles une information plus spécifique, mais il s'agit d'une technique plus complexe et moins confortable pour le patient.

Les électrodes de surface et les électrodes œsophagiennes enregistrent le signal EMG brut émanant des muscles respiratoires et permettent de déterminer le niveau et la séquence d'activation de ces muscles tout au long du cycle respiratoire. L'analyse fréquentielle de l'EMG permet, en recherche, d'étudier la fatigue des muscles respiratoires.

Les électrodes intramusculaires permettent d'enregistrer, de façon relativement sélective, l'activité EMG du diaphragme et des muscles intercostaux. Elles mesurent la fréquence de décharge des motoneurons et peuvent aider au diagnostic de maladies neuromusculaires. Toutefois, ces techniques sont traumatiques et d'application difficile.

Stimulations

Les tests de stimulation mesurent la qualité de la transmission nerveuse et neuromusculaire, ils permettent de ce fait d'évaluer l'intégrité des voies de conduction motrice. Ils reposent toujours sur le même concept : l'étude des caractéristiques de la réponse EMG (potentiel d'action composite) d'un muscle à la stimulation d'une structure nerveuse qui lui est afférente. Les principales caractéristiques de cette réponse EMG sont au nombre de deux : d'une part la latence qui se définit comme le délai entre la stimulation et le début du potentiel d'action, d'autre part l'amplitude du potentiel d'action. Ces stimulations peuvent être de nature électrique ou magnétique. La stimulation électrique est peu coûteuse et relativement sélective, mais elle est inconfortable et parfois techniquement difficile. La stimulation magnétique est plus simple à réaliser et moins inconfortable, mais elle est moins sélective. Enfin, ces stimulations peuvent être de nature périphérique ou centrale. Les stimulations périphériques permettent d'évaluer l'intégrité des neurones, alors que les stimulations du système nerveux central permettent d'évaluer l'intégrité des voies de conductions centrales.

Dans le cas particulier du diaphragme, les voies de conduction périphérique sont limitées aux seuls nerfs phréniques. L'examen électrophysiologique consiste donc à les stimuler de

façon électrique ou magnétique et à étudier la réponse du diaphragme à cette stimulation. À titre d'exemple, les latences sont allongées au cours de certaines pathologies neuromusculaires comme les pathologies démyélinisantes et l'amplitude du potentiel d'action composite est réduite en cas de lésions traumatiques des nerfs phréniques.

L'exploration des voies de conduction centrale à destinée diaphragmatique fait principalement appel à la stimulation magnétique trans-crânienne. Il est alors possible de mesurer le temps de conduction centrale. Un allongement du temps de conduction centrale peut se voir, par exemple, au cours de la sclérose en plaques. Les lésions traumatiques du rachis cervical peuvent quant à elles s'accompagner d'une interruption totale de la conduction centrale. La stimulation trans-crânienne n'est pas sélective et l'application de cette technique au système respiratoire est une compétence hautement spécialisée.

Recueil du signal EMG : choix de l'électrode

Électrodes œsophagiennes

Outre les principaux inconvénients que sont les risques minimes de reflux, d'inhalation, et de bradycardie vagale lors de la mise en place de la sonde, l'utilisation des sondes d'EMG œsophagiennes peut se compliquer d'effets indésirables de gravité variable. Le passage de la sonde au travers de la filière nasale et rhino-pharyngée peut se compliquer d'hémorragies, tout particulièrement chez les patients porteurs de troubles de l'hémostase. Il convient par ailleurs d'être prudent lorsqu'il existe des troubles de la déglutition, et ce afin d'éviter la survenue de fausses-routes et notamment la mise en place accidentelle de la sonde œsophagienne dans la filière trachéale. Enfin, comme avec tout dispositif réutilisable, il existe un risque difficilement évaluable de transmission d'agents infectieux.

Par ailleurs, une sonde œsophagienne enregistre simultanément l'activité des deux héli-diaphragmes, innervés chacun par l'un des deux nerfs phréniques. Il n'est donc pas possible, avec ces sondes, d'étudier de façon séparée l'activité de chaque héli-diaphragme. Cet inconvénient devient majeur lorsque l'on souhaite étudier la réponse EMG du diaphragme à des stimulations qui, intrinsèquement, activent simultanément les deux nerfs phréniques, comme la stimulation magnétique cervicale, la stimulation magnétique antérieure, ou les stimulations trans-crâniennes...

Électrodes intramusculaires

De façon récente, Hodges et coll. [4] ont montré que le recueil de l'activité EMG diaphragmatique spontanée par électrodes filaires, insérées sous contrôle échographique, était relativement fiable. Ces auteurs ont en revanche montré que, lors d'enregistrements prolongés, il existait un risque de déplacement de l'électrode, avec comme conséquence le ris-

que d'enregistrer accidentellement l'activité d'un muscle intercostal au lieu de celle du diaphragme.

Électrodes de surface

Le recueil de l'EMG diaphragmatique au moyen d'électrodes de surfaces a fait l'objet de plusieurs travaux. Leurs résultats sont détaillés ci-dessous (*cf. infra*).

Étude de la conduction périphérique : stimulation électrique ou stimulation magnétique des nerfs phréniques ?

Stimulation électrique

Au cours de ces dernières années, on dénombre peu de publications marquantes exclusivement consacrées à la stimulation électrique des nerfs phréniques. Luo et coll. [5] se sont intéressés au risque de contamination de la réponse diaphragmatique enregistrée au moyen d'électrodes de surface par l'activité EMG émanant de muscles innervés par les racines du plexus brachial. En effet, ces racines sont souvent stimulées conjointement au nerf phrénique car anatomiquement proches de ce dernier et donc souvent incluses dans le champ électrique du stimulateur. Ces auteurs ont montré qu'une co-stimulation des racines du plexus brachial était susceptible de contaminer les électrodes diaphragmatiques de surface et exposait donc au risque de réaliser des mesures de latences erronées [5]. Ces résultats montrent combien il est important de veiller à stimuler spécifiquement le nerf phrénique, ce qui est une limite de cette technique.

Stimulation magnétique

La stimulation magnétique des nerfs phréniques peut se faire par plusieurs approches. Avec l'approche cervicale postérieure, habituellement dénommée stimulation magnétique cervicale, la bobine de stimulation est appliquée en regard de C7 [6]. Contrairement à ce qui était initialement supposé, ce ne sont pas les racines cervicales inférieures qui sont stimulées, mais plus probablement les nerfs phréniques dans leur trajet intra thoracique, et ce de façon simultanée [7]. L'approche antérieure, pré-sternale, permet de stimuler simultanément les deux nerfs phréniques en apposant la bobine en regard de la face antérieure du sternum. Un des avantages de cette approche est sa simplicité de réalisation, notamment chez les patients alités et difficilement mobilisables, comme les patients de réanimation [8]. En revanche, avec cette approche, les électrodes de recueil cutanées sont en général dans le champ magnétique, ce qui est souvent source d'artéfacts majeurs sur l'enregistrement EMG. Enfin, la stimulation magnétique des nerfs phréniques peut être réalisée par une approche unie ou bilatérale antérieure, au moyen d'une ou deux bobines en forme de « huit » [9]. Quelle que soit l'approche choisie, l'activation simultanée des deux nerfs phréniques permet de mesurer aisément la

pression que produit l'activation du diaphragme et donc d'étudier le couplage électromécanique de ce muscle.

La stimulation magnétique cervicale est relativement peu spécifique des nerfs phréniques et stimule conjointement un certain nombre de racines cervicales, ce qui peut être un inconvénient. En effet, il existe dès lors une activation du diaphragme et de certains muscles de la cage thoracique comme le grand pectoral, le grand dentelé et le grand dorsal. Il y a par conséquent un risque de contamination de la réponse EMG diaphragmatique enregistrée au moyen d'électrodes de surface par un signal émanant de muscles voisins. Verin et coll. [10] ont récemment comparé la latence de la réponse du diaphragme et de certains muscles de la cage thoracique, mesurée par électrodes de surface et électrodes aiguilles. Ils ont ainsi montré que des électrodes de surface placées au 7^e et 8^e espace intercostal sur la ligne médio-claviculaire étaient à même de recueillir une réponse EMG diaphragmatique non contaminée et donc de mesurer de façon fiable la latence de la réponse EMG de ce muscle [10].

Chez les patients tétraplégiques et paraplégiques hauts, le déficit musculaire abdominal rend la toux inefficace. Il est maintenant montré que la stimulation magnétique des racines dorsales de ces patients (D10) produit en moyenne une pression gastrique de 74 cmH₂O et un débit expiratoire de pointe de 209 ml [11]. La répétition de ces stimulations à la fréquence de 25 Hz pendant 600 ms permet d'accroître la pression gastrique et le débit expiratoire de pointe [12].

Étude de la conduction centrale : stimulation magnétique trans-crânienne

La stimulation électrique trans-crânienne n'a pas fait l'objet de récents travaux en clinique, et ce principalement en raison de la douleur qui accompagne ce type de stimulation. Cette technique de stimulation centrale n'a donc pas réellement trouvé d'application clinique.

Les contre-indications aux stimulations magnétiques restent inchangées. On notera que le port de stent intra-coronaire n'est *a priori* pas une contre-indication à la stimulation magnétique [13].

Modalités de la stimulation magnétique trans crânienne

La stimulation magnétique transcrânienne a fait l'objet de nombreux travaux, tant méthodologiques que cliniques.

On sait maintenant qu'il est possible de recueillir la réponse du diaphragme à une stimulation magnétique trans-crânienne réalisée chez un patient relaxé, ce qui dispense donc de faciliter systématiquement cette réponse par un effort inspiratoire [14].

Depuis le milieu des années 1990, plusieurs équipes ont contribué au développement de la double stimulation magné-

tique trans-crânienne, qui consiste à délivrer au travers de la même bobine deux stimulus successifs, le premier étant infra-liminal (donc ne s'accompagnant pas d'une réponse motrice) et le second supra liminal. Cette technique de stimulation permet d'explorer les interactions inhibitrices et facilitatrices intra-corticales et peut révéler des anomalies que ne retrouve pas la stimulation magnétique trans-crânienne conventionnelle. La double stimulation a surtout été appliquée aux muscles distaux et proximaux des membres et a permis de mettre en évidence des anomalies des interactions inhibitrices et facilitatrices intra-corticales dans des pathologies comme la chorée d'Huntington, la maladie de Parkinson, et certaines formes d'épilepsie. Un récent travail a montré que cette technique pouvait être appliquée au diaphragme [15].

Enregistrement de la réponse EMG du diaphragme à la stimulation magnétique transcrânienne

La stimulation magnétique transcrânienne est peu spécifique de l'aire corticale motrice gouvernant le diaphragme et stimule conjointement un certain nombre d'autres aires corticales motrices. Il s'agit d'un inconvénient de cette technique puisqu'il existe dès lors une co-activation du diaphragme, de certains muscles de la cage thoracique et des muscles abdominaux, avec un risque de contamination de la réponse EMG diaphragmatique enregistrée au moyen d'électrodes de surface. Il est maintenant montré que des électrodes de surface placées au 7^e et 8^e espace intercostal sur la ligne médio-claviculaire sont à même de recueillir une réponse EMG diaphragmatique non contaminée et donc de mesurer de façon fiable la latence de la réponse motrice de ce muscle [16].

Applications cliniques de la stimulation des nerfs phréniques et de la stimulation magnétique transcrânienne

Stimulation des nerfs phréniques

Les valeurs normales des latences motrices des nerfs phréniques, en réponse à la stimulation magnétique cervicale sont maintenant établies et sont supposées normales si < 6,5 ms.

La recherche de bloc neuromusculaire par la mise en évidence d'un décrétement réversible de l'amplitude du potentiel d'action composite lors d'une stimulation électrique répétée (4 Hz) du nerf phrénique est possible et est retrouvée dans la myasthénie ou lors de certaines intoxications [17].

Stimulation magnétique trans-crânienne

Rappelons ici que le désagrément associé à l'utilisation de la stimulation électrique trans-crânienne a limité son utilisation en clinique. La latence de la réponse du diaphragme à la stimulation trans-crânienne est, chez des sujets sains, d'environ 16 ms. L'usage est de considérer cette latence

comme normale si elle est < 18 ms. Attention toutefois, des latences diaphragmatiques trop courtes (< 14 ms) font suspecter une contamination de la réponse par l'activité EMG émanant de muscles avoisinants.

En clinique, plusieurs travaux ont montré l'intérêt de la stimulation magnétique trans-crânienne dans le diagnostic de l'atteinte respiratoire qui peut être associée à des nombreuses pathologies du système nerveux central : accidents vasculaires cérébraux [18, 19], sclérose en plaques [20], lésions médullaires [21]... La stimulation trans-crânienne peut aussi aider le clinicien dans certaines démarches thérapeutiques, comme lors de l'identification des candidats à la stimulation phrénique implantée [22].

Applications physiologiques des techniques électrophysiologiques d'exploration des muscles respiratoires

À côté de leurs applications cliniques, les techniques électrophysiologiques d'exploration des muscles respiratoires ont de nombreuses applications physiologiques.

Stimulations

Depuis 1998, un certain nombre de travaux ont été consacrés à l'intérêt de la stimulation trans-crânienne dans le diagnostic de la fatigue musculaire d'origine centrale ou supraspinale. De façon générale, la fatigue se définit comme une altération des capacités musculaires contractiles réversible au repos. Contrairement à la fatigue périphérique dont le mécanisme siège au niveau de la jonction neuro-musculaire ou du muscle lui-même, la fatigue centrale résulte d'une diminution de la commande centrale avec comme conséquence une diminution de l'activité des motoneurones destinés aux muscles respiratoires [23]. Verin et coll. [24] ont étudié la réponse motrice du diaphragme et du quadriceps à des stimulations centrales et périphériques, et ce au décours d'un exercice maximal s'accompagnant de fatigue. Ils ont retrouvé une diminution de l'amplitude des potentiels moteurs diaphragmatiques et quadricipitaux évoqués par la stimulation trans-crânienne, alors que la force ou pression produite par ces deux muscles en réponse à des stimulations périphériques n'était pas altérée. La stimulation transcrânienne s'avère donc être un outil diagnostique de la fatigue diaphragmatique d'origine centrale.

La stimulation trans-crânienne pourrait par ailleurs trouver sa place dans l'exploration du contrôle de la ventilation. C'est ainsi que Straus et coll. [25] ont montré qu'une augmentation de l'intensité de la commande respiratoire centrale par l'inhalation d'un mélange gazeux contenant 7 % de CO₂ s'accompagnait d'une facilitation de la réponse du diaphragme aux stimulations trans-crâniennes. À l'inverse, Sharshar et coll. [26] ont montré que la ventilation mécanique s'accompagnait d'une diminution de cette même réponse motrice.

Enfin, l'étude de la réponse EMG du diaphragme à la stimulation magnétique transcrânienne ne se limite pas à la mesure de la latence et de l'amplitude : l'étude de la période silencieuse peut en effet se révéler intéressante. En réponse à une stimulation magnétique transcrânienne, le potentiel moteur est suivi d'une période silencieuse au cours de laquelle l'EMG ne montre aucun signal. Lefaucheur et coll. [27] l'ont étudiée dans le cas particulier du diaphragme et ont montré que sa durée était proportionnelle à l'intensité de l'effort respiratoire (évalué au travers de la pression transdiaphragmatique), mais n'était pas liée à la nature de cet effort (volontaire ou réflexe).

Électromyographie

Depuis 1998, on recense plusieurs travaux marquant dans le domaine de l'électromyographie appliquée aux muscles respiratoires. Ces travaux ont principalement contribué à comprendre d'une part la séquence d'activation des muscles intercostaux externes lors de l'inspiration et d'autre part le rôle postural du diaphragme.

De Troyer et coll. [28] ont évalué la distribution spatiale de la commande centrale aux muscles intercostaux lors de la respiration spontanée. Pour se faire, ils ont enregistré au moyen d'électrodes intramusculaires l'activité EMG en différents points des muscles intercostaux chez six sujets sains. Alors que l'activité musculaire de la portion dorsale des 3^e et 5^e espaces était phasique, une telle activité n'était retrouvée dans la portion ventrale du 3^e espace que chez 3 sujets et n'était jamais retrouvée dans la portion dorsale du 7^e espace. De plus, la portion ventrale du 3^e espace était activée avant les autres sites et la fréquence de décharge des unités motrices y était supérieure. La portion dorsale du muscle du 3^e espace était activée en même temps que les muscles intercostaux parasternaux. Ces résultats suggèrent que la distribution spatiale de la commande motrice centrale suit des gradients postéro-anérieurs et supéro-inférieurs qui reflètent la distribution spatiale des contraintes mécaniques.

Butler et coll. [29] ont mesuré la fréquence de décharge inspiratoire des unités motrices du diaphragme et des muscles intercostaux parasternaux en position couchée et debout et n'ont pas retrouvé de différence importante. Hodges et coll. [30] ont quant à eux étudié l'activité EMG du diaphragme lors de mouvements répétés des bras. Ils ont montré que lors de ces mouvements, il existait bien-sûr une activité EMG diaphragmatique phasique synchronisée avec l'inspiration, mais qu'il existait aussi une activité EMG diaphragmatique synchronisée avec les mouvements des bras. Ces données suggèrent donc que la contraction du diaphragme peut être en rapport avec le contrôle du tronc. Ainsi, l'activité des motoneurons phréniques est telle qu'elle peut contribuer simultanément à l'inspiration et au contrôle postural du tronc.

Potentiels évoqués corticaux

Alors que les voies centrales efférentes font l'objet de travaux de depuis longtemps, l'étude des voies afférentes est rela-

tivement récente. En effet, bien qu'il soit connu de longue date que les êtres humains peuvent aisément discerner les charges mécaniques appliquées à l'appareil respiratoire, la quantification de cette perception par l'étude des potentiels somesthésiques évoqués par les charges inspiratoires est assez récente [31]. Ces potentiels peuvent être facilement évoqués par l'occlusion inspiratoire des voies respiratoires [32]. Cependant, l'origine de ces potentiels n'est pas univoque et peut impliquer les voies afférentes à plusieurs composantes de l'appareil respiratoire. Knafelc et coll. [33] ont montré que l'amplitude d'une des composantes de ce potentiel était proportionnelle à l'importance des charges résistives imposées au système et à la pression que produisait le diaphragme en réponse à ces charges. Une partie de ce potentiel est donc liée à l'activité des muscles inspiratoires, dont le diaphragme et, notons ici que la stimulation des nerfs phréniques peut en elle-même évoquer un potentiel somesthésique [34, 35]. Des travaux récents suggèrent que ce potentiel évoqué respiratoire pourrait être modérément influencé par des afférences provenant des voies aériennes sous-glottiques [36], mais pas par les voies aériennes supérieures [37].

Conclusion

En conclusion, l'évaluation de l'intégrité de l'appareil neuromusculaire respiratoire fait appel à une multitude d'explorations électrophysiologiques. Si certaines d'entre-elles restent du domaine de la recherche, beaucoup d'autres sont maintenant utilisées de façon courante en pratique clinique. Néanmoins, toutes ces techniques demandent une certaine expérience et nécessitent un appareillage spécifique. Les indications de telles explorations étant larges et fréquentes, il est maintenant nécessaire que ces techniques soient disponibles dans un nombre croissant de centres. Il faudra pour cela les rendre plus accessibles au clinicien souhaitant les utiliser.

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/rmt/accesLibre/MusclesRespiratoiresVF.htm>.
- 3 Laghi F, Tobin MJ : Disorders of the respiratory muscles. *Am J Respir Crit Care Med* 2003 ; 168 : 10-48.
- 4 Hodges PW, Gandevia SC : Pitfalls of intramuscular electromyographic recordings from the human costal diaphragm. *Clin Neurophysiol* 2000 ; 111 : 1420-4.
- 5 Luo YM, Polkey MI, Lyall RA, Moxham J : Effect of brachial plexus co-activation on phrenic nerve conduction time. *Thorax* 1999 ; 54 : 765-70.
- 6 Similowski T, Fleury B, Launois S, Cathala HP, Bouche P, Derenne JP : Cervical magnetic stimulation. A new method of bilateral phrenic nerve stimulation for use in clinical practice. *Rev Mal Respir* 1988 ; 5 : 609-14.

- 7 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.
- 8 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.
- 9 Luo YM, Johnson LC, Polkey MI, Harris ML, Lyall RA, Green M, Moxham J : Diaphragm electromyogram measured with unilateral magnetic stimulation. *Eur Respir J* 1999 ; 13 : 385-90.
- 10 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.
- 11 Kyrrousis D, Polkey MI, Mills GH, Hughes PD, Moxham J, Green M : Simulation of cough in man by magnetic stimulation of the thoracic nerve roots. *Am J Respir Crit Care Med* 1997 ; 156 : 1696-9.
- 12 Polkey MI, Luo Y, Guleria R, Hamnegard CH, Green M, Moxham J : Functional magnetic stimulation of the abdominal muscles in humans. *Am J Respir Crit Care Med* 1999 ; 160 : 513-22.
- 13 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.
- 14 Similowski T, Straus C, Coic L, Derenne JP : Facilitation-independent response of the diaphragm to cortical magnetic stimulation. *Am J Respir Crit Care Med* 1996 ; 154 : 1771-7.
- 15 Demoule A, Verin E, Ross E, Moxham J, Derenne JP, Polkey MI, Similowski T : Intracortical inhibition and facilitation of the response of the diaphragm to transcranial magnetic stimulation. *J Clin Neurophysiol* 2003 ; 20 : 59-64.
- 16 Demoule A, Verin E, Locher C, Derenne JP, Similowski T : Validation of surface recordings of the diaphragm response to transcranial magnetic stimulation in humans. *J Appl Physiol* 2003 ; 94 : 453-61.
- 17 Similowski T, Straus C, Attali V, Girard F, Philippe F, Deray G, Thomas D, Derenne JP : Neuromuscular blockade with acute respiratory failure in a patient receiving cibenzoline. *Thorax* 1997 ; 52 : 582-4.
- 18 Similowski T, Catala M, Rancurel G, Derenne JP : Impairment of central motor conduction to the diaphragm in stroke. *Am J Respir Crit Care Med* 1996 ; 154 : 436-41.
- 19 Kiers L, Clouston P, Chiappa KH, Cros D : Assessment of cortical motor output: compound muscle action potential versus twitch force recording [published erratum appears in *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 1995 Jun ;97(3) :190]. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 1995 ; 97 : 131-9.
- 20 Laguëny A, Arnaud A, Le Masson G, Burbaud P, Deliac P, Marthan R : Study of central and peripheral conduction to the diaphragm in 22 patients with definite multiple sclerosis. *Electromyogr Clin Neurophysiol* 1998 ; 38 : 333-42.
- 21 Lissens MA, Vanderstraeten GG : Motor evoked potentials of the respiratory muscles in tetraplegic patients. *Spinal Cord* 1996 ; 34 : 673-8.
- 22 Similowski T, Straus C, Attali V, Duguet A, Jourdain B, Derenne JP : Assessment of the motor pathway to the diaphragm using cortical and cervical magnetic stimulation in the decision-making process of phrenic pacing. *Chest* 1996 ; 110 : 1551-7.
- 23 Gandevia SC : Spinal and supraspinal factors in human muscle fatigue. *Physiol Rev* 2001 ; 81 : 1725-89.
- 24 Verin E, Ross E, Demoule A, Hopkinson N, Nickol A, Fauroux B, Moxham J, Similowski T, Polkey MI : Effects of exhaustive incremental treadmill exercise on diaphragm and quadriceps motor potentials evoked by transcranial magnetic stimulation. *J Appl Physiol* 2004 ; 96 : 253-9.
- 25 Straus C, Locher C, Zelter M, Derenne J, Similowski T : Facilitation of the diaphragm response to transcranial magnetic stimulation by increases in human respiratory drive. *J Appl Physiol* 2004 ; 97 : 902-12.
- 26 Sharshar T, Ross ET, Hopkinson NS, Porcher R, Nickol AH, Jonville S, Dayer MJ, Hart N, Moxham J, Lofaso F, Polkey MI : Depression of diaphragm motor cortex excitability during mechanical ventilation. *J Appl Physiol* 2004 ; 97 : 3-10.
- 27 Lefaucheur JP, Lofaso F : Diaphragmatic silent period to transcranial magnetic cortical stimulation for assessing cortical motor control of the diaphragm. *Exp Brain Res* 2002 ; 146 : 404-9.
- 28 De Troyer A, Gorman RB, Gandevia SC : Distribution of inspiratory drive to the external intercostal muscles in humans. *J Physiol* 2003 ; 546 : 943-54.
- 29 Butler JE, McKenzie DK, Gandevia SC : Discharge frequencies of single motor units in human diaphragm and parasternal muscles in lying and standing. *J Appl Physiol* 2001 ; 90 : 147-54.
- 30 Hodges PW, Gandevia SC : Activation of the human diaphragm during a repetitive postural task. *J Physiol* 2000 ; 522 : 165-75.
- 31 Davenport PW, Friedman WA, Thompson FJ, Franzen O : Respiratory-related cortical potentials evoked by inspiratory occlusion in humans. *J Appl Physiol* 1986 ; 60 : 1843-8.
- 32 Revelette WR, Davenport PW : Effects of timing of inspiratory occlusion on cerebral evoked potentials in humans. *J Appl Physiol* 1990 ; 68 : 282-8.
- 33 Knafelc M, Davenport PW : Relationship between resistive loads and P1 peak of respiratory-related evoked potential. *J Appl Physiol* 1997 ; 83 : 918-26.
- 34 Straus C, Zelter M, Derenne JP, Pidoux B, Willer JC, Similowski T : Putative projection of phrenic afferents to the limbic cortex in humans studied with cerebral-evoked potentials. *J Appl Physiol* 1997 ; 82 : 480-90.
- 35 Zifko UA, Young BG, Remtulla H, Bolton CF : Somatosensory evoked potentials of the phrenic nerve. *Muscle Nerve* 1995 ; 18 : 1487-9.
- 36 Zhao W, Martin AD, Davenport PW : Respiratory-related evoked potentials elicited by inspiratory occlusions in double-lung transplant recipients. *J Appl Physiol* 2002 ; 93 : 894-902.
- 37 Donzel-Raynaud C, Straus C, Bezzi M, Redolfi S, Raux M, Zelter M, Derenne JP, Similowski T : Upper airway afferents are sufficient to evoke the early components of respiratory-related cortical potentials in humans. *J Appl Physiol* 2004 ; 97 : 1874-9.